



Département Géographie

Master GRN2D
(Géosciences Risques Naturels et Développement Durable)

Mémoire de Fin d'Etudes

ETUDE HYDROLOGIQUE DE L'OUED INAOUENE

Présenté par :
BADDOUR Khalil
CNE 1513802847

Soutenu, le 24 septembre 2021, devant le Jury composé de :

- Pr. HOUARI Abdelghani
- Pr. GARTET Jaouad
- Pr. OBDA Khalid
- Pr. JANATI IDRISI Abdelhamid

Président,
Encadrant,
Examinateur,
Examinateur.

Remerciement

Au terme de cette mémoire de fin d'étude nous avons mesuré combien nous sommes redevables aux gens qui m'ont aidé à la réalisation de ce travail qui est le fruit de la combinaison d'efforts, soutien et conseils de plusieurs personnes.

Je tiens tout d'abord à exprimer mes sincères remerciements et ma grande gratitude au professeur Jaouad GARTET, qui fut pour moi un encadrant attentif et un meilleur orienteur à chaque pas de ma recherche. Sa grande compétence, sa rigueur scientifique et sa grande expérience m'ont été d'une aide inestimable. Je le remercie aussi pour ses précieux conseils.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent également à tous les enseignants du master GRNDD que ce soit de la Faculté Polydisciplinaire de Taza ou externes, pour leur qualité d'enseignement et leurs conseils : CHAAOUAN Jamal, ABAHOUR Mohamed, AAFIR Mustapha, AL RAFIQ Mohamed, BOUBERRIA Abdelouahed, HOUARI Abdelghani, OBDA Khalid, BEN BRAHIM Youssef et JANATI IDRISI Abdelhamid. Je tiens aussi à remercier tout le corps professoral du département de la géographie et tout le personnel de la Faculté Polydisciplinaire de Taza.

Un grand merci aussi à mes camarades du Master GRNDD sans exception ainsi que mon camarade Said EL BOUTE, chercheur doctorant pour leur soutien matériel en matière des données et machine. D'ailleurs, un merci spécial je l'adresse à mes chers collègues Chakir HAMOUCH, Toufiq CHALH, Emad AKARBAL et Charaf-Eddine BOUSSI. Je n'oublie pas à remercier chaleureusement monsieur Mohamed Boukhari, personnel à la scolarité étudiante de la Faculté Polydisciplinaire pour sa gentillesse et son aide.

Merci encore à l'ensemble du personnel de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou et de la direction Provinciale de l'Agriculture de Taza, pour leur bienveillance et l'aide apporté en matière de données statistiques.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, qu'elle trouve en ce travail l'expression de ma profonde gratitude pour tout leur soutien et tous leurs encouragements.

Résumé

Sur une superficie de 3710 km², le bassin versant de l'oued Inaouène s'étale au nord du Maroc et constitue l'un des principaux sous-bassins-versants de l'amont du bassin de Sebou. Il se caractérise par un complexe physique assez diversifié rassemblant à la fois les propriétés de la chaîne rifaine et celles du Moyen-atlas septentrional. De ce fait, les traits de l'écoulement sont influencés d'une part par l'imperméabilité de la surface en Prérif qui favorise le ruissellement de surface et l'augmentation rapide des débits à la suite des pluies, et d'autre part, par la perméabilité des roches calcaires en zone moyen-atlasique qui contribue largement à la régularisation de l'écoulement fluvial pendant les différentes périodes de l'année. Le contexte climatique méditerranéen du bassin impacte grossièrement sur le fonctionnement du régime hydrologique de l'oued Inaouène, d'où la variabilité infra et interannuelle est une caractéristique omniprésente dans les traits de l'hydrologie d'Inaouène. En conséquence de cette variabilité, deux situations hydrologiques extrêmes se succèdent pendant l'année. D'un côté, des étiages longs surgissent surtout en période allant de la fin de printemps jusqu'au début de l'automne, avec un écoulement plus maigre et met en péril les ressources hydriques, et d'un autre côté des crues fluviales d'un volume d'eau exceptionnel provoquant un transfert important des particules et un changement plus ou moins majeur de la morphologie de la section alluviale pendant l'automne et l'hiver.

Abstract

Covering an area of 3,710 km², the watershed of the Inaouene wadi stretches out in northern Morocco and constitutes one of the main sub-watersheds upstream of the Sebou basin. It is characterized by a fairly diverse physical complex bringing together both the properties of the Rif range and those of the northern Middle Atlas. As a result, the flow characteristics are influenced on the one hand by the impermeability of the Prérif surface which favors surface runoff and the rapid increase in flows following rains, and on the other hand, by the permeability of limestone rocks in the Middle Atlas area, which largely contributes to the regularization of the river flow during the different periods of the year. The Mediterranean climatic context of the basin has a rough impact on the functioning of the hydrological regime of the Inaouene wadi, hence the infra and interannual variability is a characteristic omnipresent in the features of Inaouène hydrology. As a result of this variability, two extreme hydrological situations follow one another during the year. On the one hand, long low flows occur especially during the period going from the end of spring to the beginning of autumn, with a more meager flow and endangering water resources, and on the other hand, river floods of 'an exceptional volume of water causing a significant transfer of particles and a more or less major change in the morphology of the alluvial section during autumn and winter.

على مساحة تقدر ب 3710 كم مربع، يمتد حوض واد إناون في شمال المغرب مشكلاً أحد أهم أحواض عالية حوض سبو. تتميز البنية الطبيعية للحوض بالتنوع والاختلاف إذ تجمع بين خصائص سلسلة مقدمة الريف وميزات الأطلس المتوسط الشمالي. وعليه، فمعالم وسلوك الجريان تتأثر من جهة بطبيعة السطح بمنطقة مقدمة الريف التي تتميز عامة بعدم أو قلة نفاذيتها، التي من شأنها تحفيز السيلان السطحي والارتفاع السريع لمنسوب المياه بالمجاري خلال فترات الأمطار. ومن جهة أخرى، تتأثر بنفاذية السطح بالمنطقة المتوسطية التي من دورها تنظيم الجريان النهري خلال مختلف فترات السنة. يلعب السياق المناخي المتوسطي المميز للحوض دوراً محدداً في نمط الاشتغال الهيدرولوجي لواد إناون، إذ ينطوي عليه طابع التغيرية الزمنية السنوية والبسنوية. وبالتالي، تحدث عن هذه التغيرية ظهور شكلين للجريان النهري تتميز بحالة من الشدة والخطورة : فالأول عبارة عن ضحول وهي حالة نضوب كبير للجريان تظهر بمجرى واد إناون منذ نهاية الربيع حتى بداية الخريف وتشكل هذه المستويات المنخفضة خطراً حقيقياً على الحياة النهرية، أما الثاني فهو عبارة عن امتطاحات نهرية تظهر خاصة خلال فصل الخريف الشتاء وتتميز بارتفاع هائل لحجم الجريان المائي وكمية المنقولات الرسوبيّة مع حدوث تغييرات في مر富ولوجية في السهل الفيضي

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	6
Première Partie : Les conditions de l'écoulement fluvial dans le bassin versant de l'oued Inaouène	12
Introduction de la Première Partie.....	13
Chapitre 1 : Contexte physique du bassin-versant d’Inaouène	14
Chapitre 2 : Cadre humain du bassin Inaouène	46
Conclusion de la Première Partie	57
Deuxième partie :Bilan hydrologique du bassin versant et caractérisation du régime hydrologique de l'oued Inaouène.....	58
Introduction de la Deuxième Partie.....	59
Chapitre 3 :Bilan hydrologique du bassin versant d’Inaouène	60
Chapitre 4 :Caractérisation du fonctionnement hydrologique de l’oued Inaouène et variations naturelles des débits	73
Conclusion de la Deuxième Partie	93
Troisième partie : Étude des situations extrêmes de l'écoulement de l'oued Inaouène (étiages et crues)	94
Introduction de la Troisième Partie	95
Chapitre 5 : Etiages de l’oued Inaouène : caractérisation et variations spatio-temporelles	96
Chapitre 6 : Crues de l’Oued Inaouène : caractérisation et variation spatio-temporelles	115
Conclusion de la Troisième Partie.....	131
CONCLUSION GENERALE	133
 Bibiographie	136
Liste des cartes	139
Liste des figures	139
Liste des tableaux	142
Liste des photos	144
Table des matières	145

INTRODUCTION GENERALE

L'hydrologie est la science qui traite de la présence et de la distribution des eaux sur la terre, avec leurs propriétés chimiques, biologiques et physiques, et de leur interaction avec l'environnement physique. En tant que telle, elle est le fondement de la résolution des problèmes pratiques d'inondation, de sécheresse, d'érosion, de transport des sédiments, et de la pollution de l'eau. En effet, les inquiétudes croissantes sur la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines, les pluies acides, l'assèchement des lacs et les autres types de modifications de l'environnement liées à l'utilisation des terres, qui vont de pair avec la menace sur les ressources en eau due à l'évolution climatique et à l'élévation du niveau de la mer, ont mis au premier plan le rôle central de l'hydrologie dans beaucoup de projets concernant l'environnement.

L'hydrologie se subdivise en général en deux domaines : hydrologie de surface et l'hydrologie souterraine. Dans cette optique on va s'intéresser à l'étude de l'hydrologie superficielle et précisément l'hydrologie fluviale ou bien la potamologie. Celle-ci a pour objectif l'analyse et la compréhension des régimes hydrologiques des cours d'eau et leurs variations temporelles ainsi que l'étude de leurs situations hydrologiques particulières revêtent une place importante au sein de l'hydrologie.

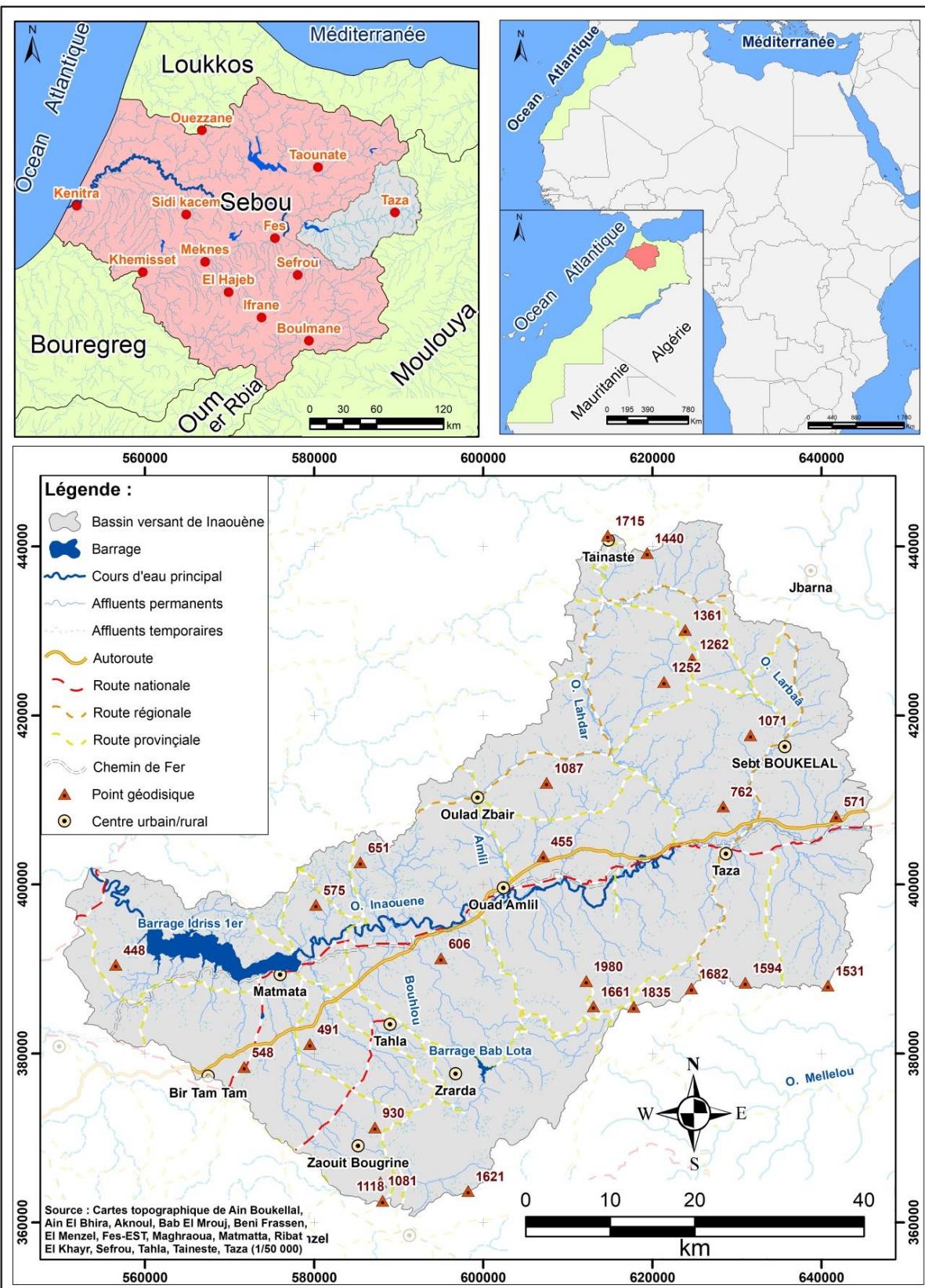
La présente étude va s'intéresser à l'étude de l'hydrologie fluviale du bassin versant de l'oued Inaouène et particulièrement la partie du bassin située au-delà la confluence de l'oued Inaouène avec l'oued Lebène. Le bassin étudié, de par sa situation géographique distincte, est considéré parmi les bassins versants montagneux typiques dans la zone méditerranéenne méridionale semi-aride, donc son régime hydrologique et ses phases extrêmes sont commandés, d'une part, par les conditions topographiques et géologiques, et d'autre part par la forte dynamique du climat méditerranéen, qui se reflète dans la forte variabilité temporelle et spatiale.

Localisation géographique de zone d'étude

D'une superficie dépassée 3710 km² au Nord du Maroc, le bassin versant d'Inaouène occupe une place typique dans le bassin versant de Sebou, dont il couvre une superficie de 9,9%. Il est limité à l'Est par le bassin versant de Msoun au Nord par le bassin d'Ouergha, au nord-ouest par le bassin de Lebène et dans le sud par le bassin versant de Melloulou. L'oued Inaouène constitue un affluent majeur de l'oued Sebou et chaque influence sur ses débits influence directement sur les volumes d'eau arrivés en aval.

Géographique, le bassin versant du haut Inaouène est situé entre les longitudes (4°51' et 3°49' ouest Greenwich) et entre les latitudes (34°35' et 34°51' nord l'équateur). Le bassin d'Inaouène constitue un point de convergence de deux grandes unités morphologiques de relief, la partie septentrionale de la chaîne du Moyen-atlas au sud et le relief collinaire du Prerif au nord et entre les deux il y a le sillon sud-rifain appelé communément le couloir Fès-Taza et auquel draine l'oued Inaouène. Les caractéristiques physiographiques et hydrographiques du bassin étudié seront alors influencées par la localisation morphologique et la structure géologique de chacun.

Administrativement, le territoire du bassin d'Inaouène appartient à la région Fès-Meknès sauf dans l'extrême est du bassin où il y a des parties de deux communes qui s'insèrent au territoire de la région de l'Est comme Oulad Bourima et Taddart. Cinq provinces appartiennent quasiment au territoire du bassin d'Inaouène mais de façon partielle, en l'occurrence provinces de Taza, Taounate, Sefrou, Fès et Guercif.



Problématique

Cette mémoire de recherche traite un ensemble de problématiques et questions liées aux traits hydrologiques du bassin versant d’Inaouène, en se focalisant sur l’analyse des débits de quatre stations hydrologiques, deux sont réparties le long de l’oued Inaouène et les autres sur les affluents majeurs qui le constituent, respectivement sur l’oued Lahder et l’oued Larbaâ.

- **Problématique majeure**

Caractérisation du régime hydrologique de l’oued Inaouène et l’analyse des formes extrêmes de l’écoulement

- **Problématiques secondaires**

-Mettre en évidence l’influence du complexe physique sur les traits d’hydrologie de l’oued Inaouène ainsi que le rôle du facteur anthropique ;

-Détermination des principaux paramètres hydro-climatiques pour l’estimation du bilan hydrologique dans le bassin ;

-Caractérisation de l’évolution temporelle des débits à l’échelle journalière et mensuelle et de sa tendance pluriannuelle ;

-Caractérisation de l’évolution spatiale de l’écoulement de l’amont vers l’aval en mettant la lumière sur les principaux facteurs de variation ;

-Mettre en relief des risques liés aux étiages et crues de l’oued.

Méthodologie et matériel

- **Méthodologie**

La méthodologie générale de cette étude sera basée sur la démarche suivante :

- ***Le travail bibliographie*** : à partir de la recherche et du recueil de différents documents associés au sujet d’étude et sur la zone d’étude, et qu’ils constituent un support préalable et essentiel dans chaque étude, tels que les articles, les ouvrages, les rapports, les mémoires et les thèses...etc.
- ***Le travail cartographique*** : qui forme un support essentiel dans l’étude géographique, et permet d’élaborer plusieurs cartes illustrant la répartition spatiale des éléments géographiques dans le terrain.

- **Le travail statistique** : est l'élément principal qui est sur lequel la présente étude se base. Il consiste généralement en le traitement et l'analyse des données recueillies par l'utilisation des différents coefficients et méthodes et statistiques appropriés à l'analyse hydrologique.
- **La rédaction du manuscrit** : qui constitue une étape primordiale dans le cadre de chaque réalisation scientifique. Elle permet la description, l'analyse et l'interprétation des résultats sous forme d'un langage écrit.

Cette démarche est basée aussi sur plusieurs outils informatiques, parmi lesquels il y a :

- Logiciels statistiques : comme Mc Excel et logiciel INSTAT, considérés comme principaux logiciels de traitement statistique des données.
- Systèmes d'informations géographiques : ils permettent l'élaboration des cartes de différents paramètres du bassin et la réalisation des coupes topographiques, parmi lesquels il y a Arc Map, Global Mapper, Google Earth Pro.

Les différents paramètres et variables hydrologiques qu'on va adopter pour caractériser le régime hydrologique et formes extrêmes de l'écoulement de l'oued Inaouène, citons les suivants :

Tableau 1 – Une synthèse des différents paramètres et méthodes pour la caractérisation hydrologique de l'oued Inaouène

Eléments étudiés	Critères	Variables/Méthodes d'étude
Variabilité hydrologique temporelle	L'échelle annuelle	-Module annuel (AMA) -Ecart à la moyenne (EM) -Coef. de variation (CV%)
	L'échelle mensuelle	-Débits mensuels bruts, -Coefficient mensuel des débits -Coefficient de variation des débits mensuels
	L'échelle journalière	-Débits journaliers bruts et cumulatifs -Débits caractéristiques
Variabilité spatiale	Caractérisation de la variabilité	-Débits spécifiques -Coefficient d'Hydraulicité -Lame d'eau éculée
	Facteurs de la variabilité spatiale	Points et paramètres de discordance
Etiages & tarissement	Débits caractéristiques d'étiages	Courbe des débits classés (DCE, EA)
	Durée d'étiage	
	Volume déficitaire	Débits seuils
	Type d'étiages	-Classification des étiages de Pardé 1968 et Fréquaut (1972),
	Tarissement et vidange en eau	-Courbe de tarissement - Coefficient de tarissement -Coefficient de vidange des nappes
Crues	Estimation des crues de différentes périodes	Méthode des moments, méthode de GRADEX
	Allure et phases de crues	L'hydrogramme de crues

- **Critique des données**

Pour réaliser cette étude on va se baser sur les débits enregistrés au niveau de trois stations hydrométriques, deux sur l'oued Inaouène (Bab Marzouka et El Kouchat) et un en amont sur l'oued Lahder. Ces stations sont toutes limnimétriques, elles mesurent juste les variations des niveaux d'eau des oueds grâce à des échelles graduées en métal fixées sur terre et sur les ponts qui les traversent. Les débits de ces stations sont fournis par l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, et ils sont obtenus à partir des hauteurs d'eau et ce en se réalisant préalablement des courbes de tarage. Cela consiste en série de jaugeages réalisés au droit d'une échelle, jaugeages dont les résultats sont reportés sur l'axe des coordonnées (y) d'un graphique. On place ensuite en abscisses (x) les hauteurs d'eau mesurées à l'échelle et correspondant aux jaugeages. En reliant les points de coordonnées on obtient une courbe appelée **courbe de tarage**, et grâce à laquelle on peut ensuite déduire tous les débits seulement à partir des hauteurs sans besoin de jaugeages répétés. L'extraction des débits par cette méthode peut avoir des inconvénients car la section des cours d'eau sont rarement stables.

Tableau 2 - Caractéristiques hydrométriques des stations de jaugeage dans le bassin d'Inaouène

<i>Stations</i>	<i>Période d'observation</i>	<i>Nombre d'années</i>	<i>Superficie contrôlée (km²)</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z (m)</i>
Bab Chhoub	1987-88 / 2010-11	24	606	622755	405665	401
Bab Marzouka	1971-72 / 2012-13	42	1510	615490	400922	350
El Kouchat	1976-77 / 2001-02	26	2647	582650	393545	223

Les données hydrométriques des stations ci-dessus dont on dispose sont sous forme de débits journaliers, mensuels et annuels et parfois instantanés pour certaines crues. Généralement, cette base de données ne permet pas de faire une vraie étude hydrologique parce que les observations parfois ne respectent pas certaines normes hydrologiques : les débits journaliers ne disposent pas de valeurs après zéro en période d'étiage. Les observations dans les trois stations étudiées sont hétérogènes que ce soit au niveau du nombre d'années ou bien au niveau de la période observée, même la période de convergence entre les données des stations reste courte et ancienne (1987-88 / 2001-02) et ce qui constitue des obstacles quand il s'agit de faire des comparaisons spatiales.

Première Partie

Les conditions de l'écoulement fluvial dans le bassin versant de l'oued Inaouène

Introduction de la Première Partie

Chapitre 1
Contexte physique du BV Inaouène

Chapitre 2
Cadre humain du bassin Inaouène

Conclusion de la Première Partie

Introduction de la Première Partie

Les caractéristiques intrinsèques des bassins versants influencent fortement leur comportement hydrologique face à une sollicitation. Leur réponse est largement déterminée par différentes caractéristiques morphologiques, comme la taille du bassin, sa forme, son élévation, sa pente, son orientation, etc., ainsi que par le couvert végétal, le type de substrat, les caractéristiques du réseau hydrographique et le facteur anthropique (Ali TAOUS, 2005). La connaissance de l'espace de chaque bassin-versant étudié, de sa géographie. C.-à-d. de son espace pris dans toute son épaisseur depuis la dynamique atmosphérique jusqu'à celle des nappes profondes, est indispensable, car chaque tranche d'espace, chaque étage, contrôle tel ou tel processus hydrologique. La dynamique hydrologique est toujours une dynamique de réservoirs et de robinets, de réservoirs se remplissant ou se vidangeant, de stocks et de flux, mais de réservoirs et de robinets de natures différentes, soumis à des forces différentes que l'hydrologue ne saurait confondre (Roger Lambert).

L'objectif de cette partie est de faire un diagnostic territorial des conditions physiques et anthropiques du bassin d'Inaouène qui contrôle directement ou de manière indirecte l'écoulement fluvial de l'oued. Pour cela, deux chapitres sont conçus :

Le premier est consacré à l'analyse du milieu physique du bassin d'Inaouène comme la topographie, géologie, climat, bioclimat, réseau hydrographique et morphométrie du bassin. Ces éléments jouent un rôle déterminant dans l'hydrologie de l'oued Inaouène car ils commandent tous les processus hydrologiques et hydrauliques allant des entrées jusqu'aux sorties. L'analyse spatiale et statistique de ces paramètres permet d'appréhender l'effet et le rôle de chacun sur les traits de l'hydrologie de l'oued Inaouène

Le second sera conçu à l'étude des facteurs humains du bassin qui contrôlent autant que les facteurs naturels sur la dynamique des ressources en eau dans le bassin d'Inaouène. En fait, celui-ci est bien anthropisé du fait du nombre d'individus qui s'y installe et l'existence d'un nombre important d'agglomérations urbaines (Taza, Tahla, Oued Amlil...). Les interventions humaines dans le bassin d'Inaouène sont multiples et peuvent être simplement mises en évidence grâce à une carte d'occupations du sol. Cette dernière permet d'avoir une vue spatiale des modes d'occupation du sol par l'homme et de détecter les zones sources d'une éventuelle influence positive ou négative sur l'écoulement.

Chapitre 1

Contexte physique du bassin-versant d’Inaouène

Sommaire

Introduction

1- Topographie du bassin

1-1- Hypsométrie du bassin

1-2- Influence de la pente du bassin

2- Contexte climatique

2-1- Précipitations

2-2- Températures

2-3- Relation entre les précipitations et la température

3- Couvert végétal

3-1- Indice de recouvrement forestier (If)

3-2- Indice normalisé de densité végétale (NDVI)

4- Cadre Géologique

4-1- Contexte lithostructural

4-2- Perméabilité du bassin

5- Morphométrie du bassin versant et de son réseau hydrographique

5-1- Géométrie du bassin

5-2- Réseau hydrographique et sa morphométrie

Conclusion du chapitre

Introduction

Cet axe est l'un de principaux piliers de cette étude car il permet d'avoir un diagnostic fin des facteurs physiographique du bassin d'Inaouène qui eux-mêmes permettent ensuite d'expliquer le mode de fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène sur les différents pas de temps (journalier, mensuel et interannuel). Les principales caractéristiques physiques qui seront évaluées dans cette optique il y a d'abord la topographie puis le climat, le couvert végétal, la géologie, le réseau hydrographique et géométrie du bassin. Tous ces éléments impactent de façon directe ou indirecte sur l'écoulement de l'oued Inaouène.

L'évaluation de l'effet des facteurs physiques du bassin-versant sur l'écoulement n'est pas une chose évidente du fait de la difficulté de mesure du poids de chacun, de leur multiplicité et inter-chevauchement mais avec l'apparition et le développement des outils de SIG et télédétection, l'évaluation des facteurs physiques deviennent possible.

Ces nouvelles techniques ont permis de donner des informations numériques caractérisant le relief et la morphométrie du bassin, le réseau hydrographique...etc. Elles sont utilisées surtout pour réaliser une analyse spatiale des caractéristiques physiographiques des bassins et la réalisation des cartes thématiques. Pourtant, cette évaluation ne permet pas d'avoir des éléments quantifiés concernant l'effet d'un tel ou tel facteur sur les traits d'hydrologie mais elle ne sert qu'à valider les hypothèses théoriques liées à l'existence ou l'absence d'un tel ou tel un élément.

1- Topographie du bassin

Les caractéristiques topographiques telles que les altitudes, les pentes, influent largement sur le comportement hydrologique d'un bassin versant, puisque de nombreux paramètres météorologiques et hydrologiques (précipitations, température, débits spécifiques, vitesse d'écoulement...) varient en fonction de ces éléments.

Le bassin versant d'Inaouène est caractérisé par une diversité typique car il est composé d'un relief hybride, à la fois du relief de Moyen-atlas au sud et celui de Prerif au Nord du bassin et entre les deux unités morphologiques il y a une dépression appelée sillon sud-rifain dont les altitudes varient entre 137 m et 500m et au niveau de laquelle drainent l'oued Inaouène et certains affluents dans une direction de l'est vers l'ouest.

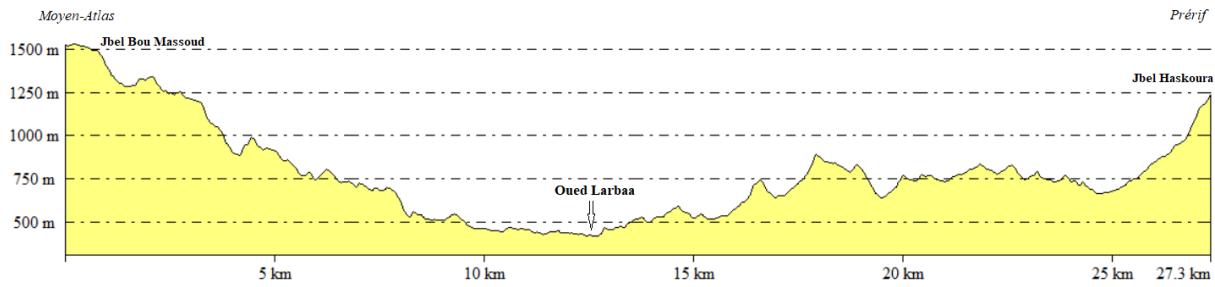


Figure 1 - Coupe topographique dans le secteur d'amont du bassin-versant d'Inaouène (du Moyen-atlas au Pré rif)

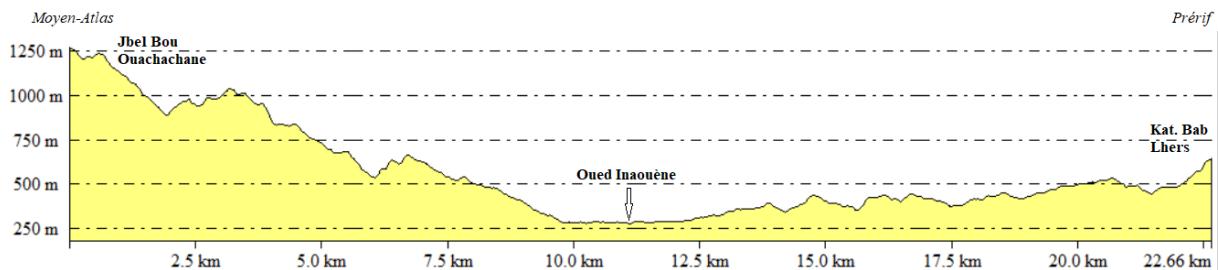


Figure 2 - Coupe topographique dans le secteur moyen du bassin-versant d'Inaouène (du Moyen-atlas au pré rif)

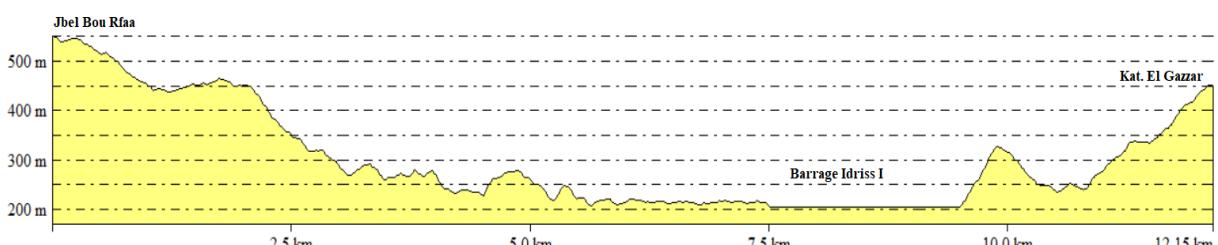


Figure 3 - Coupe topographique dans la basse vallée du bassin-versant d'Inaouène (Sillon sud-rifain)

1-1- Hypsométrie du bassin

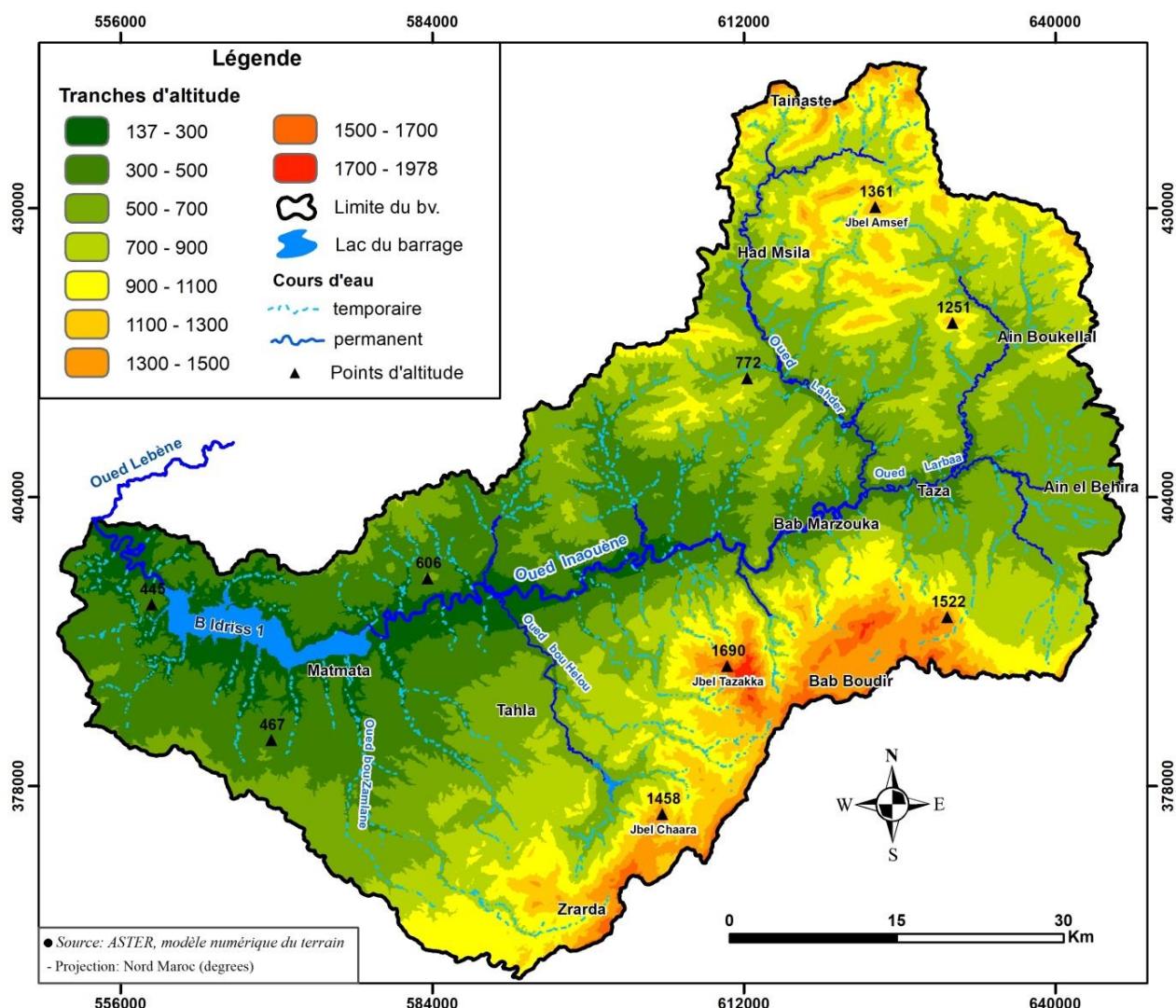
En effet, l'altitude dans le bassin joue un rôle capital, son rôle s'exprime dans le domaine de l'hydrologie fluviale par le fait de l'influence orographique sur les quantités des pluies reçues et sur la température ambiante. En pratique, l'hypsométrie du bassin-versant peut être caractérisée par trois éléments essentiels : la carte des tranches altimétriques, la courbe hypsométrique et les altitudes caractéristiques.

1-1-1- La répartition des tranches d'altitude

La répartition des altitudes peut être représentée par une carte hypsométrique, en classant les aires altimétriques au-dessus d'une altitude donnée, et ceci est facilement en se basant sur un modèle numérique du terrain en faisant des mesures dans un logiciel de SIG.

Tableau 3- Répartition des surfaces des tranches d'altitude dans le bassin d'Ineauène

Tranches d'altitude	Surface en km ²		Surface en %	
	séparée	cumulée	séparée	cumulée
137 - 300	286	286	7,7	7,7
300 - 500	816	1102	22	29,7
500 - 700	1059	2161	28,5	58,3
700 - 900	731	2892	19,7	78
900 - 1100	428	3320	11,5	89,5
1100 - 1300	209	3530	5,6	95,1
1300 - 1500	134	3664	3,6	98,8
1500 - 1700	41,2	3705	1,1	99,9
1700 - 1978	4,9	3710	0,1	100



Carte 2 - Répartition des tranches d'altitudes du bassin de l'oued Inaouène à la confluence avec l'oued Lebène

Les altitudes dans le bassin varient entre 137 m et 1978 m, mais elles se répartissent de façon inégale dans l'ensemble du bassin du fait de la différenciation des unités morphologiques. En effet, la partie préfaine se distingue par un relief collinaire où l'élévation s'oscille entre 500 et 1500 m, alors que le Moyen-atlas présente un relief élevé et accidenté surtout dans la partie plissée comme Bab Boudir et dans le massif paléozoïque de Tazekka où l'altitude varie entre 900m et 1978m. Cette zone reçoit des précipitations abondantes par rapport à la zone rifaine et des températures plus douces, ce qui favorise le développement d'un couvert végétal important et contribuent à l'alimentation des cours d'eau. Entre les deux unités, il y a le sillon sud-rifain où l'altitude est très basse (137 et 500 m) sous forme de dépression. Malgré la diversification du relief du bassin, les tranches altimétriques variant de 300 et 900 m restent les plus dominantes (70,2 %).

1-1-2- Courbe hypsométrique et altitudes caractéristiques

Elle est obtenue à partir d'une carte hypsométrique, en calculant la répartition de la surface du bassin versant (km^2 et en %) en fonction de son altitude (en m). Elle est tracée sur la figure 3 en portant en ordonnée (Y) l'altitude, et en abscisse (X) le pourcentage de la surface du bassin dont l'altitude est à supérieure ou égale à Y, rapportée à la surface totale du bassin. La répartition hypsométrique est donnée par le pourcentage de la surface comprise entre les différentes courbes de niveau (Tableau 2).

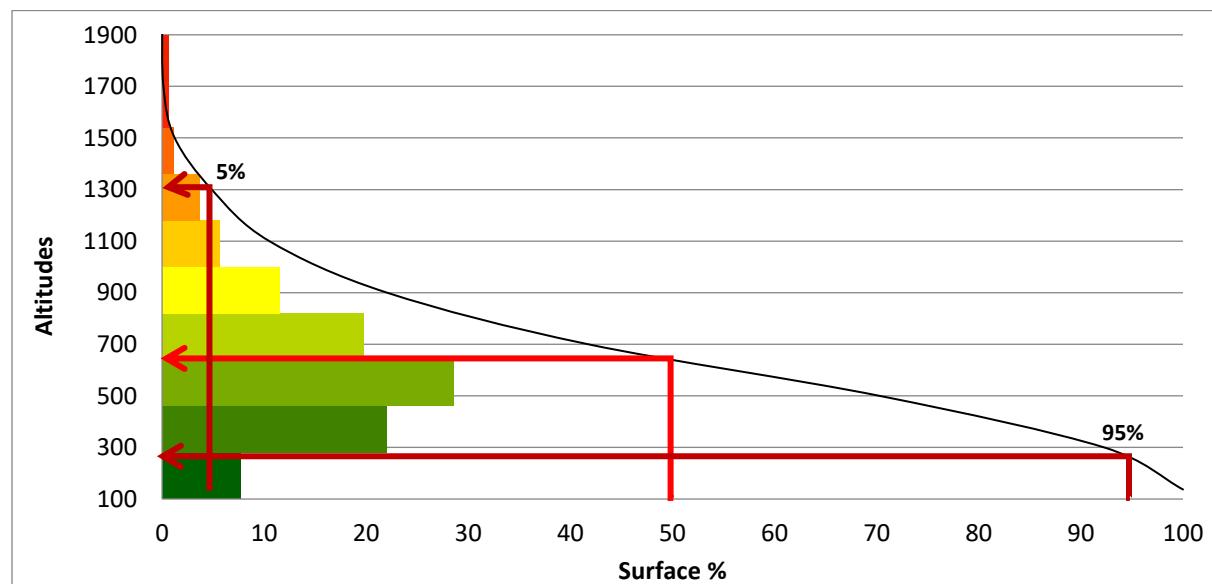


Figure 4 – Courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Inaouène

En effet, la courbe hypsométrique permet une bonne visualisation des altitudes caractéristiques et présente alors un grand intérêt dans l'analyse du comportement hydrologique des bassins versants puisque la majorité des facteurs météorologiques et hydrologiques dépend de l'altitude.

A partir de la courbe hypsométrique on peut déduire que le bassin d'Inaouène se caractérise par un relief jeune dominé par des altitudes allant de 500 à 700m. D'après cette courbe on peut extraire un certain nombre d'altitudes caractéristiques (tableau 3).

Tableau 4 – Altitudes caractéristiques du bassin de l'oued Inaouène

<i>Altitude caractéristiques</i>	<i>Mode de détermination</i>	<i>Valeur en (m)</i>
Altitude maximale (Hmax)	Le point le plus élevé dans le bassin	1978 à Jbel Tazekka
Altitude minimale (Hmin)	Le point le plus bas du bassin (l'exutoire)	137
Altitude relative (Hr) (*1)	Hr = Hmax – Hmin	1841
Altitude moyenne (Hmoy)	Hmoy = $(\sum Si * hi)/S$. Si : surface comprise entre 2 courbes de niveau. Hi : altitude moyenne entre 2 courbes de niveau. S : surface du bassin versant en km ² .	687
Altitude médiane (Hméd)	La valeur de l'altitude correspondant à l'abscisse de 50% dans la courbe hypsométrique	640

1-2- Influence de la pente du bassin

La pente constitue l'un des facteurs fondamentaux de l'hydrologie, son action apparaît dans la vitesse de transmission des eaux collectées par les différents canaux du réseau hydrographique. L'eau ruisselle d'autant plus fort que la surface est très inclinée.

1-2-1- Indices de pente

Plusieurs indices ont été développés pour estimer la grandeur de la pente dans un bassin versant, on en retient cinq les plus utilisés. Ces indices renseignent sur la topographie du bassin et donnent une bonne indication sur le temps de parcours de ruissellement direct et donc sur le temps de concentration.

D'après les indices de pente utilisés, il s'avère que le système de pente du bassin d'Inaouène est généralement raid. La raideur de la pente permet de brusques concentrations des débits et donne une grande vitesse aux eaux, ce qui est directement à l'origine des conséquences

catastrophiques des événements hydrodynamiques exceptionnels (effet de chasse d'eau), (GARTET, 1994).

Tableau 5 – Indices de pentes du bassin versant de l'oued Inaouène

Indices de pente	Mode de calcul	Valeur (m/km)	Etat de pente
Indice de pente moyenne (Im)	$Im = ((\sum Lcn) \cdot d) / S$ -Cn : longueur de courbes de niveau ; -d : équidistance (m); -S : surface du bassin versant (km^2).	240	Très forte
Indice de pente global (Ig)	$Ig = D/L$ -D : dénivellation, définie sur la Cr hypsométrique, D= h5% - h95% -L : longueur du rectangle équivalent	6,07	(incompatible au bv étudié)
Indice de pente de Rocher (IP)	$IP = \sqrt{\frac{Ig}{0,8}}$ -Ig : indice de pente global	2,75	Forte
Dénivellation spécifique (Ds)	$Ds = Ig \cdot \sqrt{S}$ - Ig : indice de pente globale -S : surface du bassin versant (km^2)	369,7	Forte (Rang 6)
Les reliefs-ratios (IAS)	$IAS = (H_{max} - H_{min}) / L$ -Hmax : altitude maximale du bassin (m). -Hmin : altitude minimale du bassin (m). -L : longueur du plus long thalweg (km).	9,31	Forte

1-2-2- Répartition spatiale du système de pente

Les indices de pente donnent des indications chiffrées qui semble très satisfaisantes pour l'évaluation de la pente du bassin. Mais ils demeurent incapables de mettre en évidence la réalité de la distribution spatiale des pentes dans l'ensemble du bassin, et c'est l'avantage que présentent les cartes.

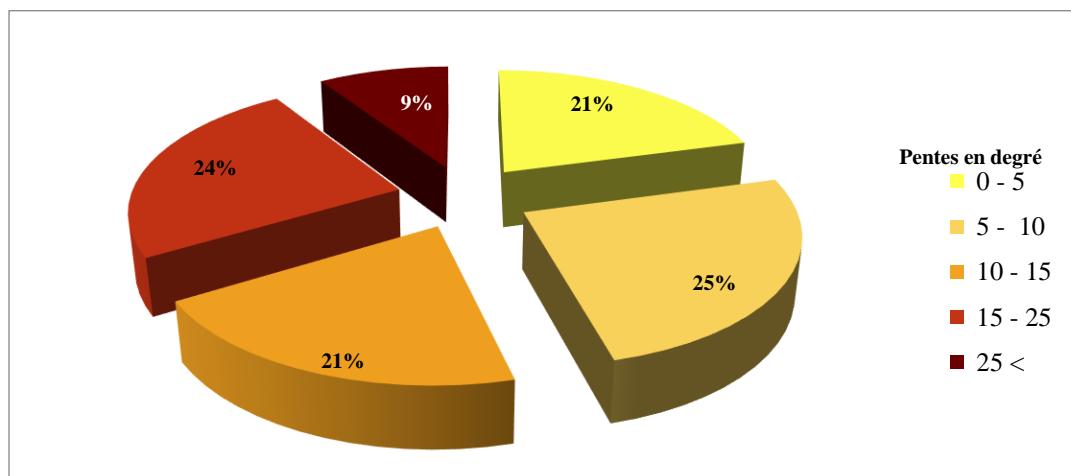
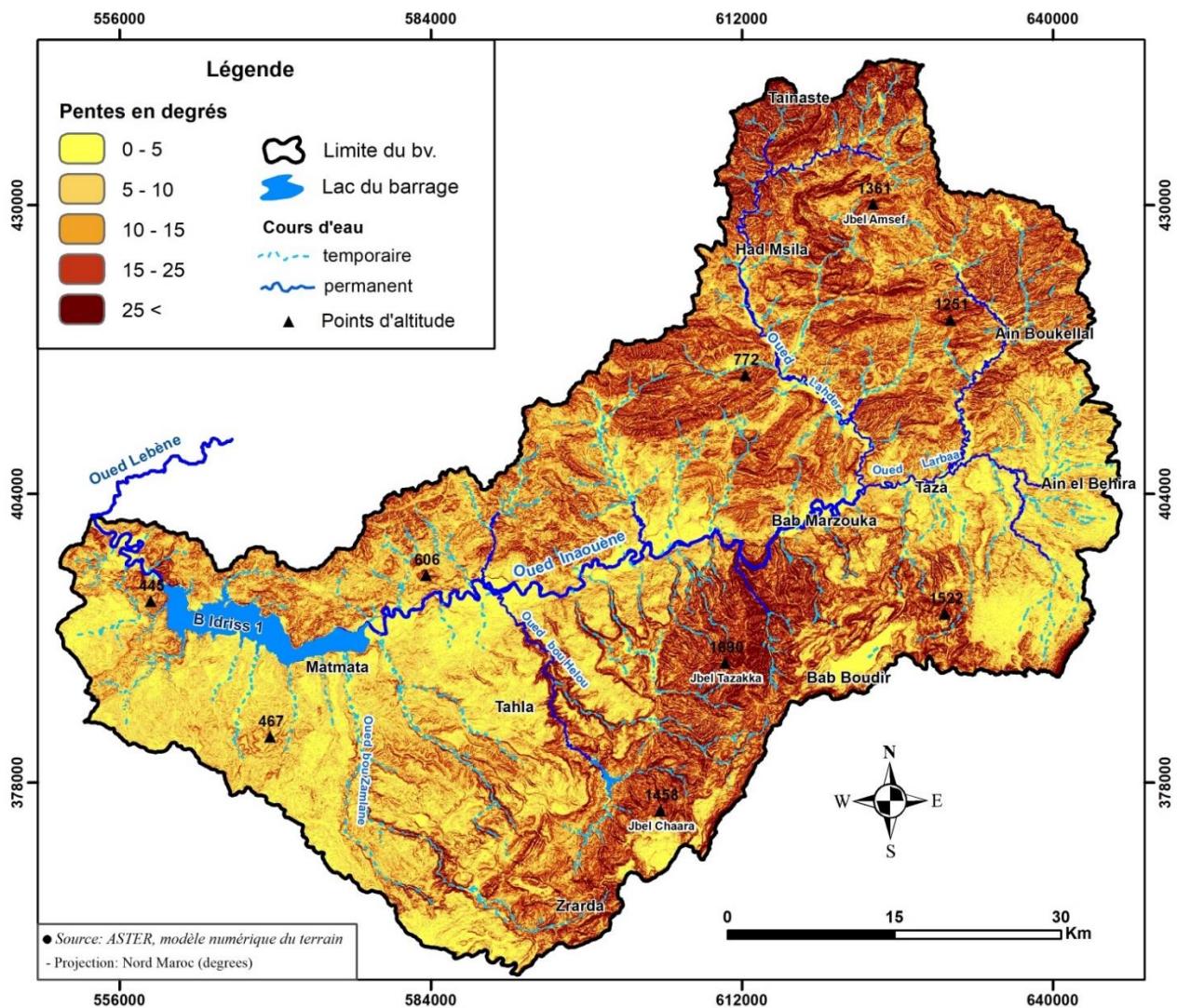


Figure 5 - Répartition du pourcentage des pentes dans le bassin



Carte 3 – Répartition des pentes dans le bassin versant de l'oued Inaouène

A partir de la carte et du graphique ci-dessus on observe que les pentes faibles et très faibles ($>10^\circ$) sont les plus dominantes (environ 46%). Elles se répartissent essentiellement sur l'ensemble du sillon sud-rifain et sur les surfaces du plateau de Tahla et les grandes plaines alluviales. Puis il y a les pentes fortes et très fortes ($15^\circ <$) qui couvrent aussi une superficie assez importante dans le bassin (33%), surtout dans les collines pré rifaines et le moyen-atlas et qui constituent des zones motrices de l'écoulement où les eaux prennent leur vitesse pour s'écouler rapidement vers l'exutoire et favorisent des pics de crues au moment des averses.

2- Contexte climatique

Le climat est le facteur physiographique qui influence le plus l'hydrologie des cours d'eau. Plusieurs paramètres climatiques régissent sur l'écoulement fluvial, parmi lesquels il y a la pluviométrie du bassin considérée comme étant le déclencheur des débits, et puis la température comme étant le facteur destructeur des eaux.

2-1- Précipitations

Les précipitations sont considérées comme le facteur générateur des débits, plus les précipitations sont abondantes plus les débits sont forts. Ainsi, les grandes crues, avant tout, le résultat de pluies fortes, même si d'autres facteurs peuvent accentuer ou diminuer la puissance de la crue.

2-1-1- Lame d'eau précipitée

Pour calculer la lame d'eau précipitée moyenne interannuelle sur le bassin d'Inaouène, on va se baser la méthode des isohyètes qui nécessite un ensemble des mesures ponctuelles obtenues à plusieurs stations pluviométriques sur le bassin et à proximité.

En fait, les isohyètes sont des lignes de même pluviosité. Grâce aux valeurs pluviométriques acquises aux stations du bassin et aux autres stations avoisinantes et à l'aide d'un SIG, on peut tracer le réseau d'isohyètes comme on le ferait pour celui des courbes de niveau.

Une fois les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne précipitée peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i \cdot P_i}{A}$$

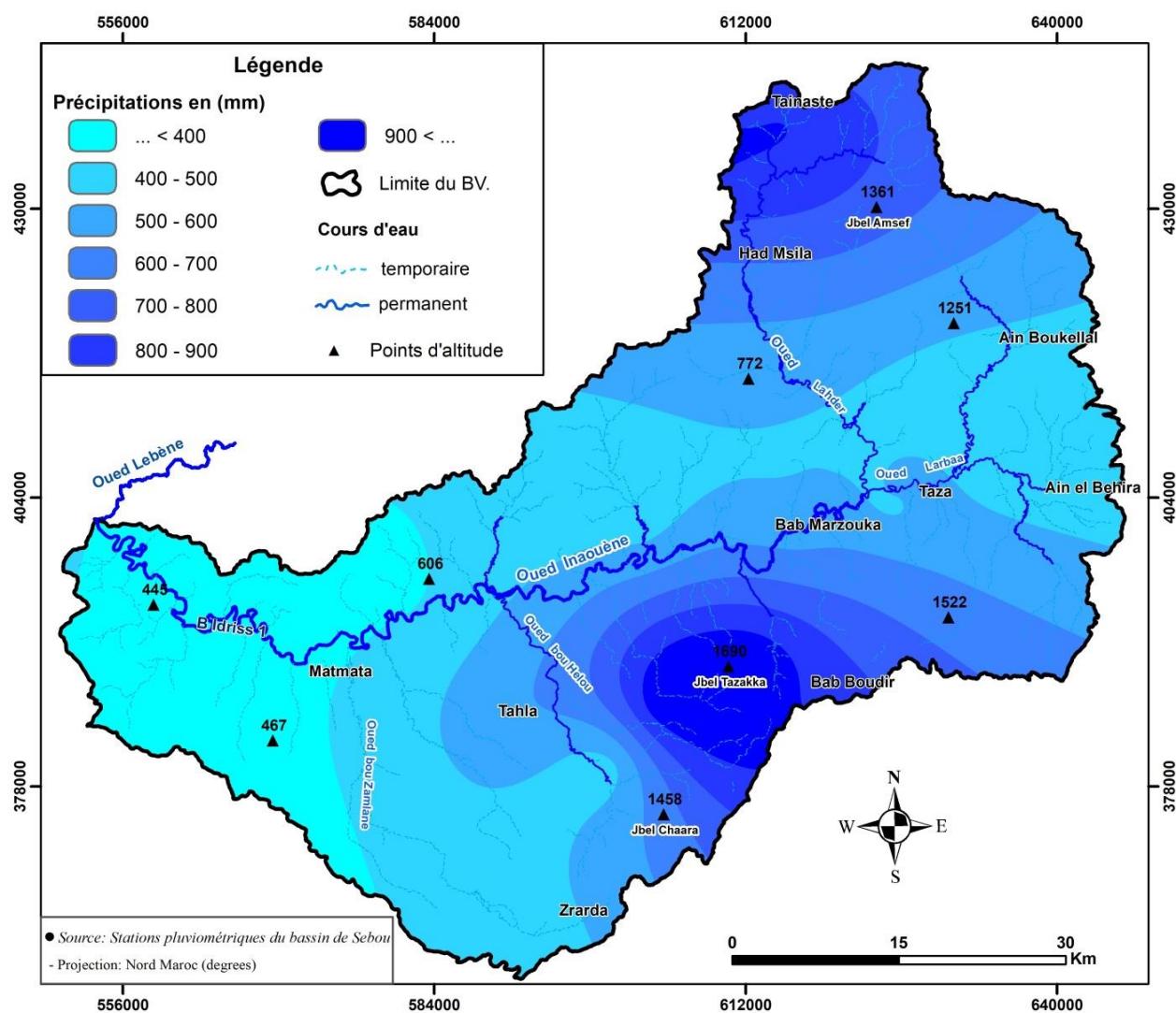
Où

- P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,
- A : surface totale du bassin
- A_i : surface entre deux isohyètes i et $i+1$,
- K : nombre total d'isohyètes,
- P_i : moyenne des hauteurs h de précipitations entre deux isohyètes i et $i+1$.

Tableau 6– Les isohyètes et leur surface dans le bassin

Tranche de précipitation (mm)	Surface (km ²)	Lame d'eau précipitée (Pmoy)
< 400	86,5	584 mm
400 - 500	787,4	
500 - 600	1 464,3	
600 - 700	870,2	
700 - 800	270,3	
800 - 900	164,6	
> 900	66,2	

Le bassin d'Inaouène reçoit des précipitations moyennes annuelles variant entre 360 mm et environ 1100 mm. La moyenne de la lame d'eau précipitée est de l'ordre de 584 mm/m², l'équivalent de 58,4 millions m³ d'eau en an. Néanmoins, les pluies ne tombent pas de façon proportionnelle dans le bassin ; il y a des zones qui sont humides et d'autres sont moins humides. La partie du Moyen-atlas est la zone la plus humide dans le bassin et particulièrement sur le massif de Tazekka et à Bab Boudir où le total annuel est supérieur à 700mm voire à 900mm et aussi dans certaines zones dans le Pré rif comme aux montagnes de Tainaste (entre 800 et 900mm). En revanche, dans la basse vallée d'Inaouène les précipitations sont très faibles (inférieures à 500mm).



Carte 4 – Répartition spatiale de la pluviométrie dans le bassin d'Inaouène

2-1-2- Régime pluviométrique

L’analyse du régime pluviométrie temporel du bassin sera basée sur les données enregistrées au niveau de six stations réparties dans l’ensemble du bassin d’Inaouène (à l’amont, l’aval et mi-bassin). Ces stations sont aussi situées dans les différentes unités morphologiques : Sebt Boukelal et Had Msila au Pré rif, Bab Boudir et Tahla dans le Moyen-atlas, Taza et station de Barrage Idriss Premier au sillon sud-rifain.

Tableau 7 – Situation géographique des stations climatiques du bassin d’Inaouène

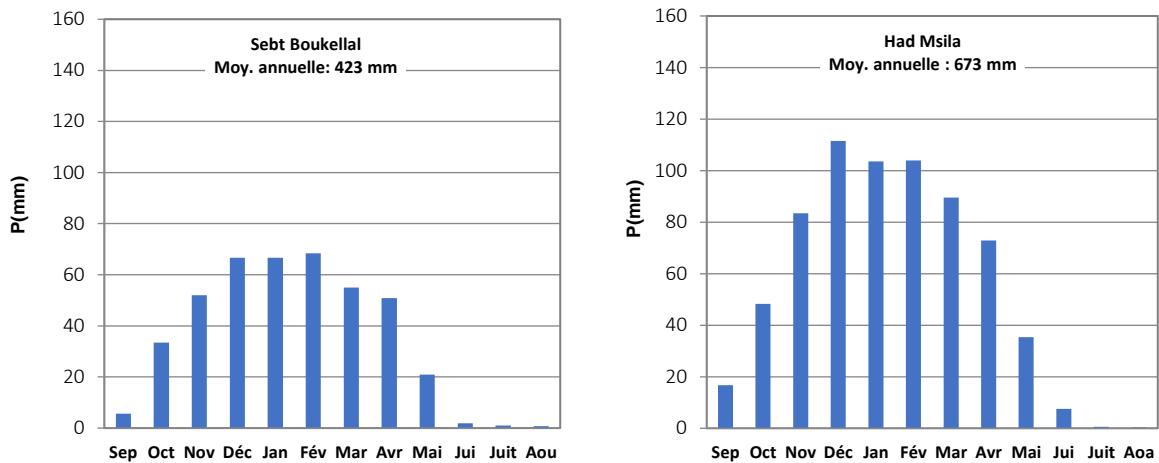
Stations	Période étudiée	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Sebt Boukelal	1970-2016	635300	417600	550
Taza	1970-2016	625711	403721	458
Bab Boudir	1972-2016	617700	386000	1568
Had Msila	1970-2016	611100	424400	540
Tahla	1970-2007	590610	383839	560
Barrage Idriss1	1970-2016	559700	39600	170

A- Régime mensuel

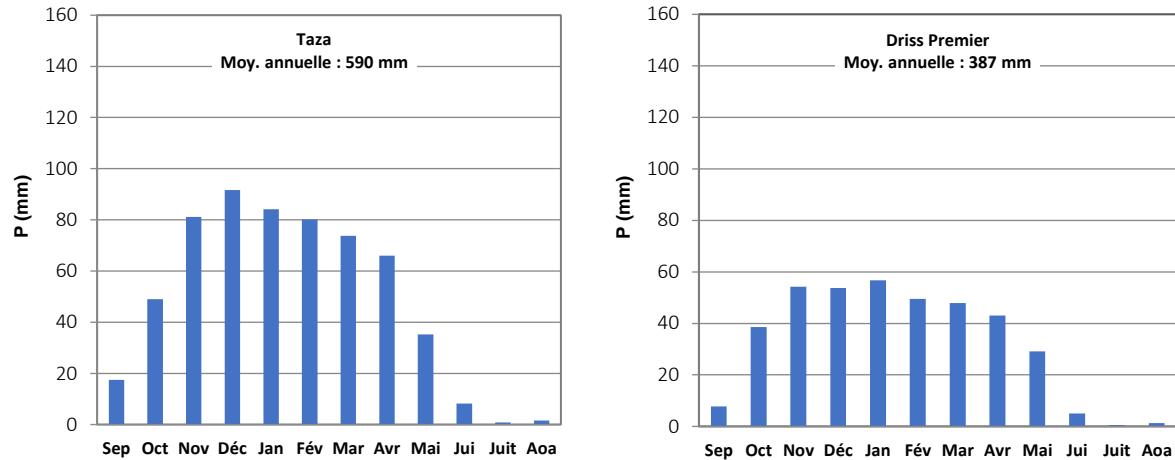
Le régime pluviométrique mensuel contrôle largement le régime hydrologique mensuel des cours d’eau dont il prend les mêmes caractéristiques.

Les précipitations mensuelles dans le bassin d’Inaouène subissent à des irrégularités d’un mois à l’autre, et d’une station à l’autre. Généralement, les stations qui reçoivent la grande quantité des précipitations sont respectivement Bab Boudir et Had Msila alors que la station la moins humide c’est celle du barrage Driss Premier (à l’aval du bassin). Cette variation spatiale dépend essentiellement du facteur orographique (altitude, exposition). Temporellement, la distribution prend les traits du climat méditerranéen. la pluviosité devient importante pendant les mois allant de novembre à avril, avec des concentrations en décembre, janvier et en février où l’abondance pluviométrique moyenne de chacun de ces mois dépasse 60 mm sauf pour la station de Driss Premier.

Stations dans le Pré rif



Stations dans le sillon sud-rifain (Couloir Fès-Taza)



Stations dans le Moyen-atlas

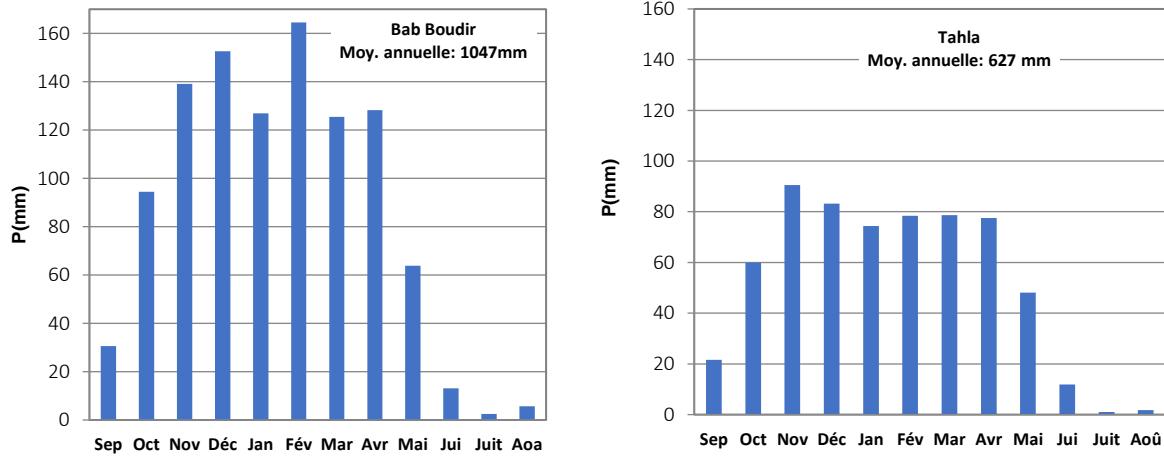


Figure 6 - Régime pluviométrique moyen mensuel des stations climatiques du bassin d'Inaouène
[Durée d'observation 1970 - 2016]

Afin de mettre en évidence la nature climatique du mois, on peut utiliser le *Coefficient pluviométrique* ‘‘*q*’’ qui consiste à rapporter la valeur moyenne observée à ce que serait la hauteur mensuelle de pluie. Le coefficient *q* sera supérieur à 1 si le mois est humide et y inférieur s’il est sec. Ce coefficient se déduit par l’équation suivante :

$$q = p/\pi$$

p : Total mensuel de la pluviométrie d’un mois ;

$$\pi = \frac{P \times 30}{365} \quad \text{où } P : \text{Total pluviométrique annuel.}$$

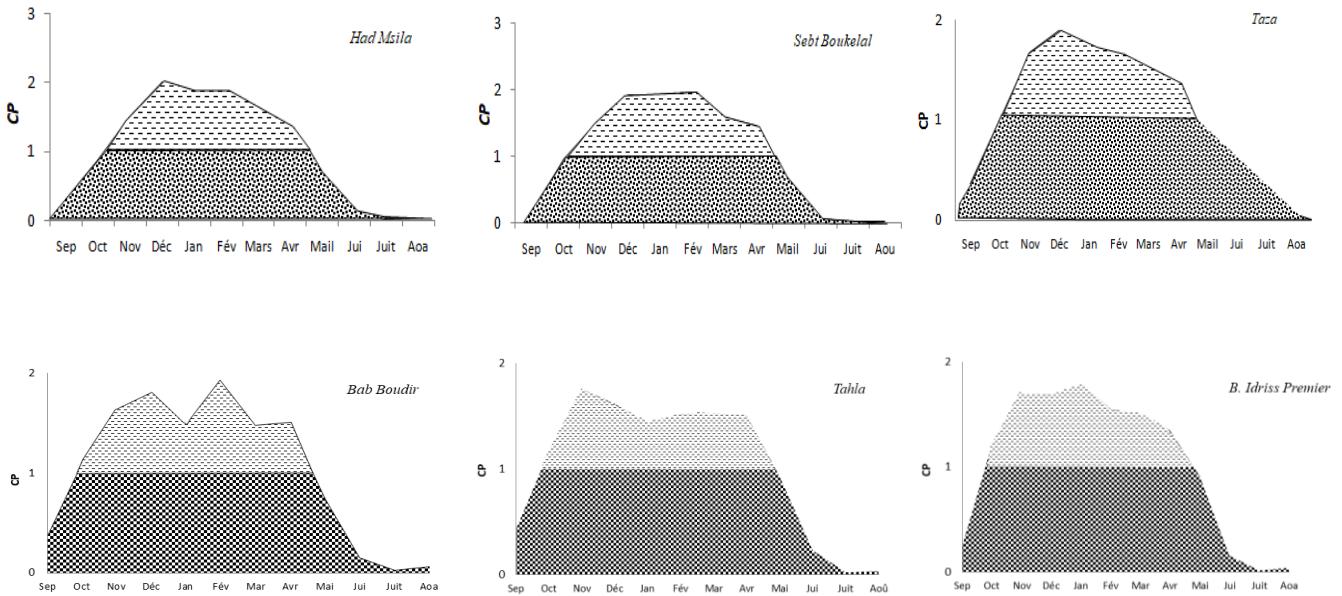


Figure 7 – Période d’abondance et d’indigence pluviométrique au niveau des stations climatiques du bassin d’Inaouène selon le coefficient pluviométrique (CF)

[Durée d’observation 1970 - 2016]

A partir de l’indice pluviométrique calculé sur les données des stations étudiées, on constate que la période d’abondance pluviométrique se prolonge d’octobre à avril (7mois) sauf pour Had Msila et Sebt Boukelal dont la période d’abondance est un peu réduite (de novembre à avril). Généralement, cette distribution va tracer ses empruntes sur le régime hydrologique qui va se coïncider avec le régime pluviométrique. Durant les périodes d’indigence hydrologique les débits seraient faibles voire nuls et vice-versa.

B- Précipitations annuelles

La pluviométrie annuelle contrôle largement le bilan hydrologique dans le bassin versant, et sa variation entraîne des changements dans l’hydrologie des cours d’eau. En effet, les cumuls pluviométriques annuels reçus par le bassin d’Inaouène connaissent des variations considérables d’une année à l’autre, une caractéristique intrinsèque du climat méditerranéen.

Bien que la forte pluviosité que reçoive Bab Boudir, la variation annuelle reste très élevée par rapport aux autres, tantôt elle enregistre des cumuls supérieurs à 2000mm et tantôt inférieurs à 500 mm.

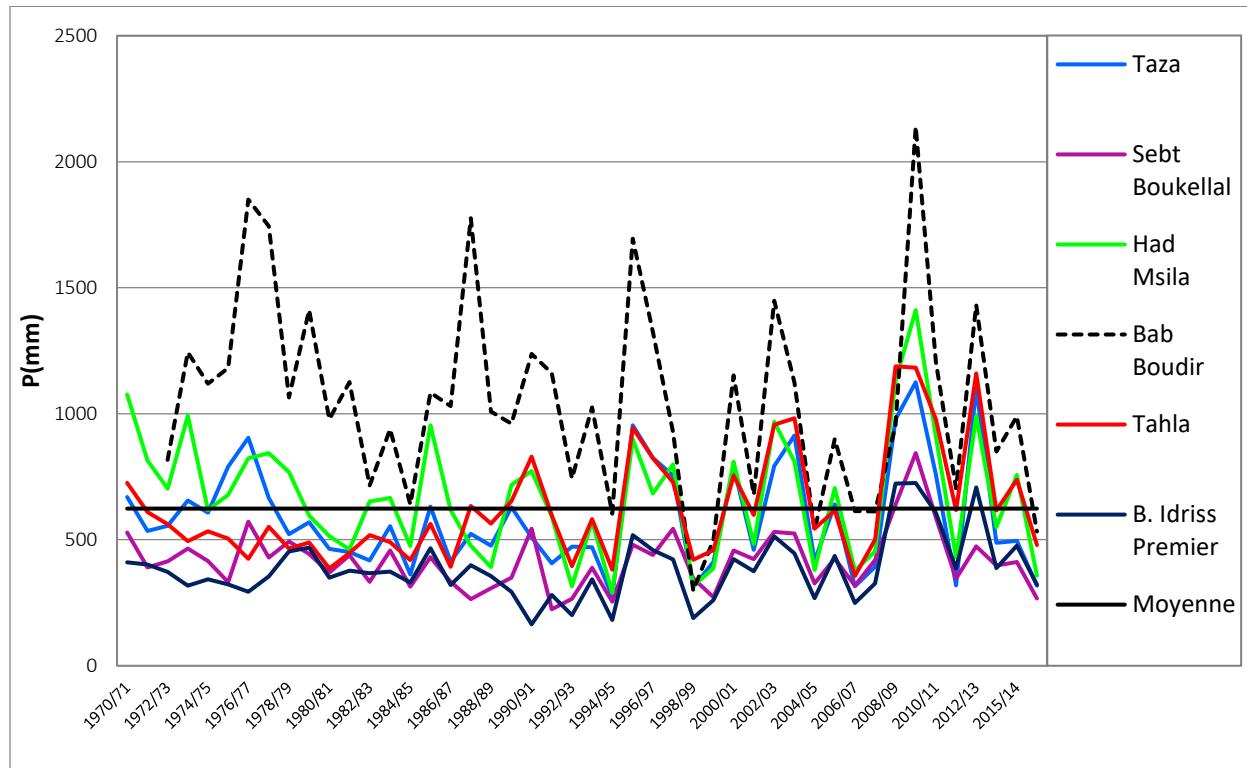


Figure 8 - Variation interannuelle des précipitations annuelles aux stations du bassin d'Inaouène

Afin de mieux décrire les caractéristiques climatiques des années on peut recourir à l'**indice standardisé des précipitations SPI** qui permet de quantifier le déficit des précipitations et de classer les années suivant le degré de sécheresse ainsi que leur sévérité, et par conséquent, il donne une indication sur l'impact de la sécheresse sur la situation de différents types de ressources naturelles, y compris les ressources en eau.

Cet indice se calcule de la manière suivante :

$$SPI = (Pi - Pm) / \tilde{\sigma}$$

Où Pi : la somme des précipitations de l'année x ;

Pm : la moyenne interannuelle des précipitations ;

$\tilde{\sigma}$: l'écart-type.

Pour cet indice, McKee et al (1993) ont proposé le système de classification suivant :

Tableau 8 - Classes de l'indice standardisé des précipitations

Classes de SPI	type de période
2,0 et plus	Extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche à la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sèche
de -1,5 à -1,99	Très sèche
de -2 et moins	Extrêmement sèche

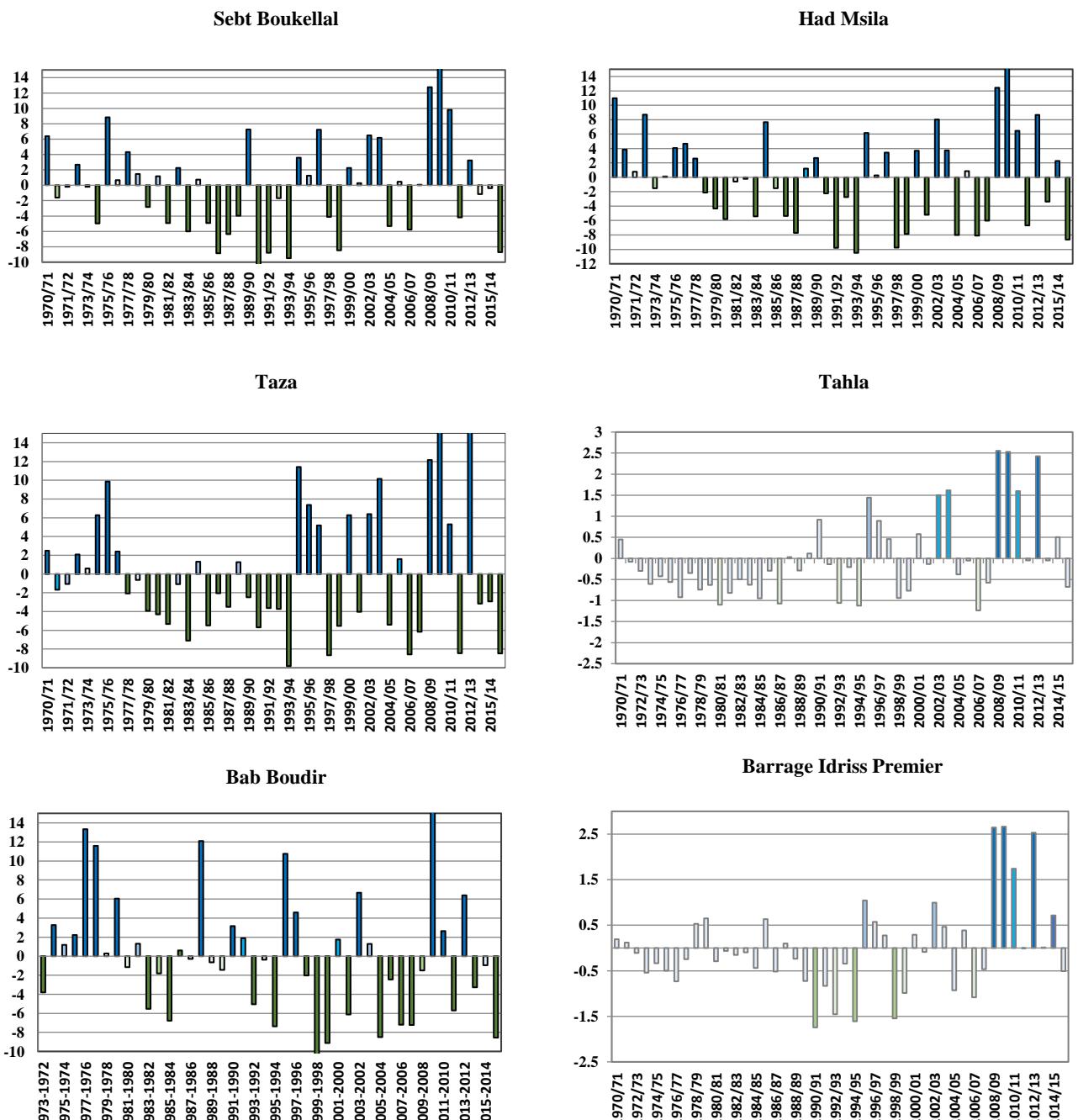


Figure 9 – L'indice SPI pour les stations du bassin d'Iñaouène

L'indice SPI des stations pluviométriques du bassin montre une alternance des années plus ou moins humides et d'autres plus ou moins sèches. Le déficit pluviométrique est spatialement non identique. Apparemment, on observe que Bab Boudir, Taza, Sebt Boukellal, Had Msila, stations d'amont, connaissent une oscillation énorme de l'indice SPI qui peut varier de -12 et 12 (forte amplitude). Pendant les années très humides comme 1994-95 et 2008-09, 2009-10, 20012-13, il est prévu que l'écoulement fût abondant avec des crues.

2-2- Température

La température est un facteur climatique très important dans l'étude hydrologique surtout lorsqu'il s'agit de l'étude du bilan hydrologique puisqu'il est considéré comme un facteur destructeur des ressources en eau.

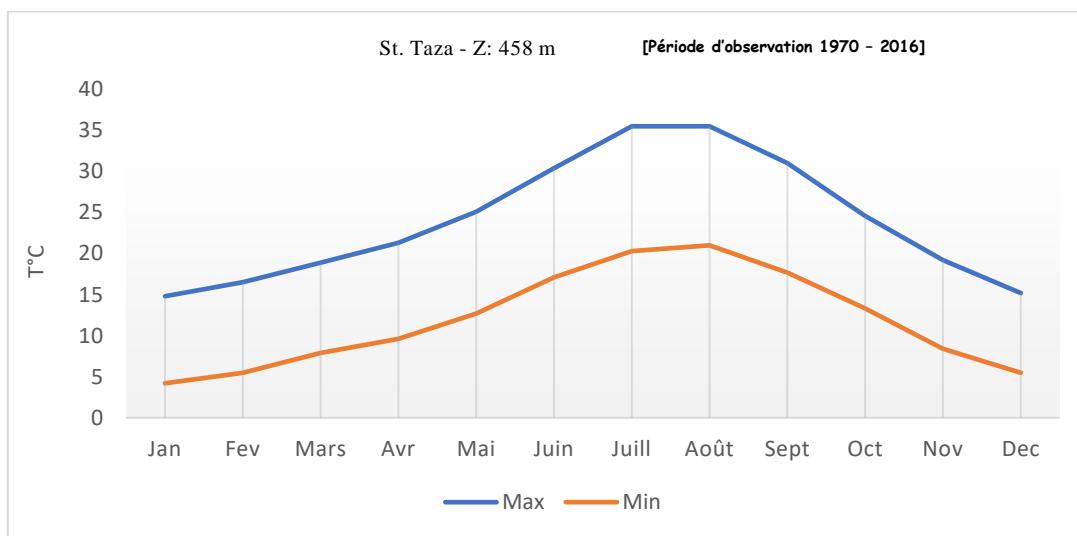


Figure 10 – Répartition mensuelle des températures au niveau de la station de Taza

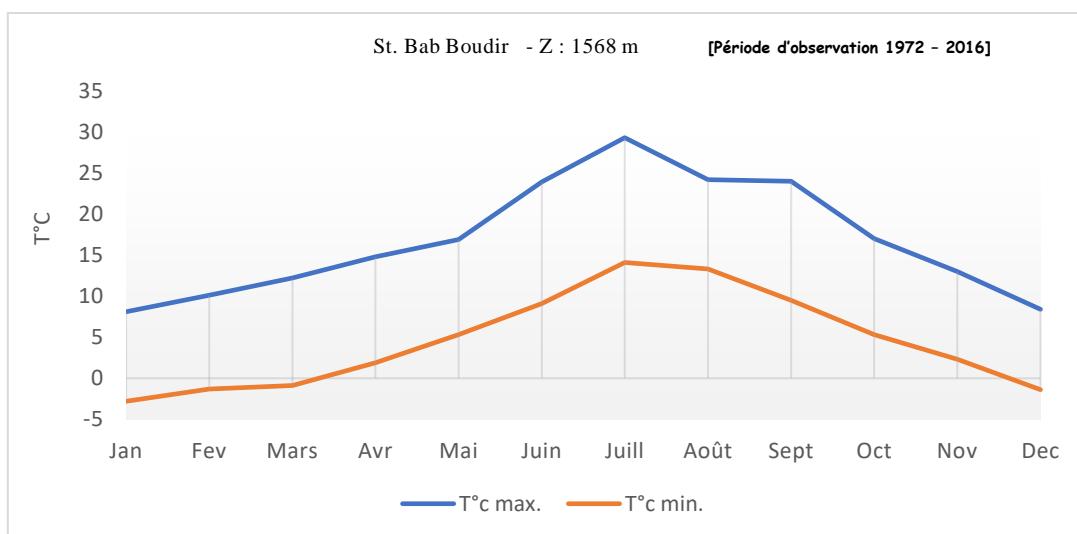


Figure 11 - Températures mensuelles au niveau de la station de Bab Boudir

La température varie non seulement suivant les moins mais aussi d'une station à l'autre. Dans les zones montagneuses comme Bab Boudir, station référentielle, les températures peuvent bassin à moins de 0°C dans l'hiver (décembre, janvier, février) en conditionnant des précipitations neigeuses qui s'installent sur les parties sommitales des montagnes comme à Jbel Bou Massoud, mont de Bab Boudir, Jbel Tazzeka, où la neige dure jusqu'au printemps. En revanche, dans les zones basses, la température minimale ne tombe pas à moins de 8°C et les températures moyennes s'oscillent juste entre 25 et 10°.

2-3- Relation entre les précipitations et la température

Le climat, régnant dans une région, peut être estimé à travers certains paramètres, qui mettent en relation la température et les précipitations caractérisant la région. Dans cette optique, l'utilisation de **l'indice xérothermique de Gausson et Bagnols** semble utile. Cet indice permet de distinguer les périodes sèches des périodes humides et le type de climat méditerranéen régnant.

Cet indice est commodément figuré par le diagramme ombrothermique avec la relation $P=2T$. Ainsi une période est considérée comme sèche, lorsque le total des précipitations (P en mm) est inférieur ou égale au double de la température (T en °C) moyenne mensuelle exprimée en degré centigrade, et dans le cas contraire la période est considérée comme humide.

Tableau 9 - Classification du climat méditerranéen selon l'indice xérothermique de Bagnols et Gausson (1954)

Classes de climat	Nombre de jours secs (X)
Climat désertique	X > 300
Climat subdésertique	200 < X < 300
Climat xéro-thermo-méditerranéen	150 < X < 200
Climat thermo-méditerranéen	100 < X < 150
Climat méso-méditerranéen	40 < X < 100
Climat subméditerranéen	0 < X < 40

Les diagrammes ombrothermiques de Gausson construits à partir des données des stations de la région, montre que la période sèche ($2T > P$) à la station de Taza est de l'ordre de 150 jours, et englobe les mois de mai, juin, juillet, août et septembre, ce qui confirme que son climat est de type **xéro-thermo-méditerranéen**. Et pour la station de Bab Boudir (Z=1568 m), la période sèche s'étend seulement sur trois mois (juin, juillet, aout), ce qui montre que son climat est de type **méso-méditerranéen**.

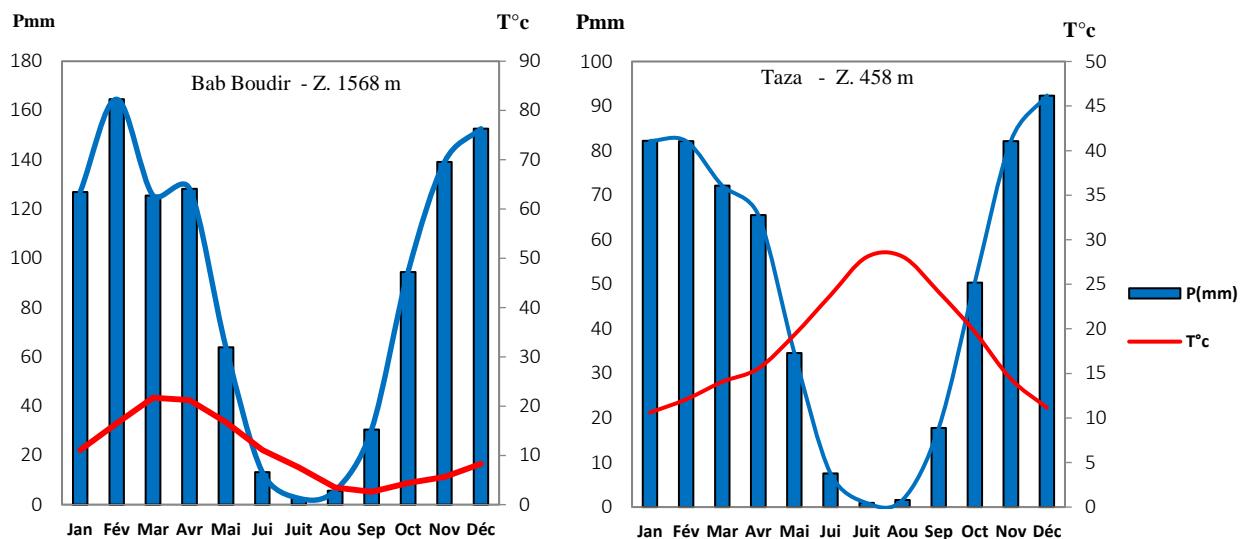


Figure 12 - Diagramme ombrothermique de Gaußen et Bagnols pour la station de Taza et Bab Boudir

Station Taza : [Durée d'observation 1970- 2016]

Station Taza : [Durée d'observation 1970- 2016]

3- Couvert végétal

Il s'agit de l'influence du couvert végétal. Hormis la couverture forestière, la végétation est un facteur variable selon les saisons climatiques. Trois interventions majeures du couvert végétal sur le plan hydrologique : l'infiltration, l'interception et la transpiration. Généralement, la végétation est considérée comme facteur régulateur de l'écoulement fluvial car elle contribue à retenir l'eau pendant la période humide et donc à la reconstitution des réserves hydriques qui vont soutenir les cours d'eau pendant la période d'étiage.

3-1-Indice de recouvrement forestier (If)

Cet indice porte un grand intérêt dans le domaine hydrologique et biogéographique car il donne une meilleure idée sur la végétation statique poussée dans le bassin dont l'influence sur les eaux pluviales et le ruissellement est durable et simultanée. Cet indice représente le rapport entre la superficie forestière (sf) avec la surface totale du bassin (S) :

$$If = (sf / S) \times 100$$

Tableau 10 - Indice de recouvrement forestier au niveau du bassin d'Inaouène

Espèces végétaux	Surface (km ²)	Indice de recouv. Forestier
Chêne Zeen	12,4	16%
Chêne liège	135,8	
Chêne Vert	336,9	
Chêne Vert Mélangé	23,1	
Lande	39,2	
Reboisements Résineux	45,1	
Reboisements Feuillus	0,5	

Le taux de recouvrement forestier est un peu faible pour le bassin d'Inaouène (16%). Cette surface est répartie essentiellement sur le Moyen-atlas et certaines zones dans le Pré rif (Tainaste, Bab Mrouj,...) et elle est composée par les quercus (chênes) et les landes et aussi par les forêts artificielles (reboisement).

3-2- Indice normalisé de densité végétale (NDVI)

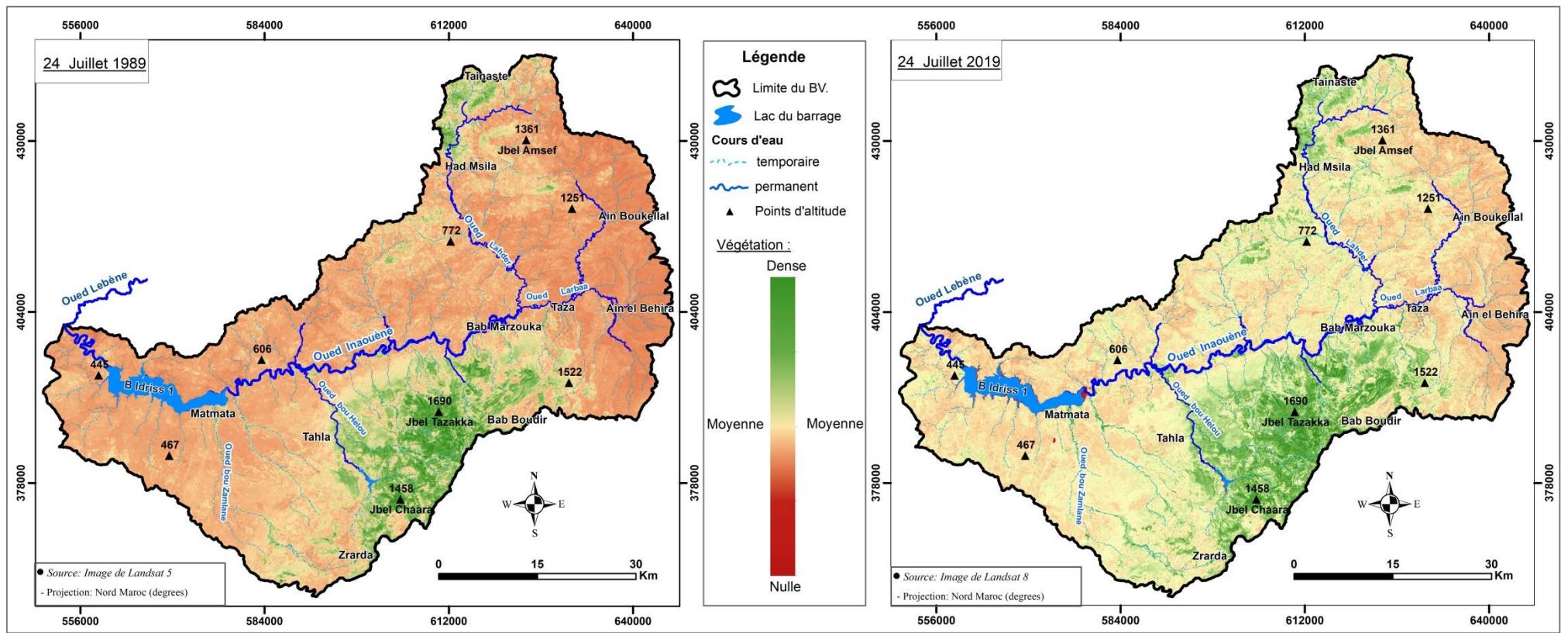
Cet indice donne une meilleure vue sur la couverture végétale statique et saisonnière. Il permet de mieux mettre en évidence de l'évolution spatio-temporelle du couvert végétal. L'utilisation de NDVI requiert des images satellitaires et un système de SIG et l'application de la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R})$$

Où : NIR : Bande du proche-infrarouge

R : bande du rouge

A partir de la carte du NDVI on observe que la densité du couvert végétal a augmenté dans les trentaines d'années passées entre 1989 et 2019. De larges surfaces avaient un couvert végétal faible voire absent sont actuellement végétalisées avec une densité moyenne voire forte. Cette végétalisation se rend aux actions de reboisements faits par la Direction Régionale des Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification (DREFD) qui a pu reboiser une surface d'environ 45,6 km² par des espèces végétales forestières. Elle est aussi grâce aux stratégies du Plan du Maroc Vert lancé en avril 2008, qui a pu végétaliser des superficies importantes par les arboricultures et les plantations fruitières comme l'olivier, l'amandier, etc. Parmi les effets que peut avoir ces actions de reboisement sur le plan hydrologique, il y a la régularisation de l'écoulement fluvial et l'augmentation du pouvoir d'infiltration des sols et leur capacité de rétention des sols.



Carte 5 + 6 - Evolution de l'indice de NDVI dans le bassin d'Inaouène entre l'année 1989 et l'année 2019

4- Cadre géologique

La géologie constitue l’élément crucial dans les études hydrologiques, parce qu’elle commande largement le comportement hydrologique des cours d’eau. Son influence s’aperçoit au niveau de la perméabilité du terrain et la constitution des nappes souterraines et la détermination du trajet de la circulation d’eau souterraine, et dépendent d’elles-mêmes de la pétrographie du bassin, la tectonique (failles, diaclases,), la structure et le pendage des couches.

4-1- Contexte lithostructural

Le bassin d’Inaouène se situe à la jonction de trois grands domaines structuraux qui, du N au S, sont :

- le Complexe prérifain méridional,
- le Sillon sud-rifain,
- le Moyen Atlas septentrional.

4-1-1- Complexe prérifain

Le Pré rif est un mélange ou un complexe (VIDAL, 1983) de formations charriées allant du Primaire jusqu’au Tertiaire. Il est un domaine de déformations souples sous forme de nappes de charriage dont le matériel est très hétérogène et difficile à identifier et constitue un relief collinaire mou, à dominante argilo-marneuse. Le complexe pré rifain est caractérisé par l’importance et la diversité des éléments remaniés de nature et âge différents sous forme de klippes sédimentaires dans une matrice marneuse. D’importantes accumulations de galets arrondis (W de Taza), de nature et de taille variées, caractérisent également les remaniements du Complexe (ROBILLARD, 1978). Plusieurs formations se rencontrent au sein du complexe pré rifain, les plus anciennes sont les formations triasiques. Il s’agit des marnes rouges associées à d’importantes masses de gypse blanc à rougeâtre. Plus loin à l’extrémité nord-est du bassin à Tainaste, des affleurements calcaires et dolomitiques du lias et crétacé supérieurs forment un relief rocheux appelé les *Sofs*, et qui constituent le contact avec le Rif Méridional. Ensuite, il y a les marnes blanches à silex de l’Eocène qui s’affleurent sous forme de klippes visibles au NW de Taza. Finalement il y a l’Oligocène, peu représenté, qui est formé de grès en gros bancs brun-roux (ROBILLARD, 1978).

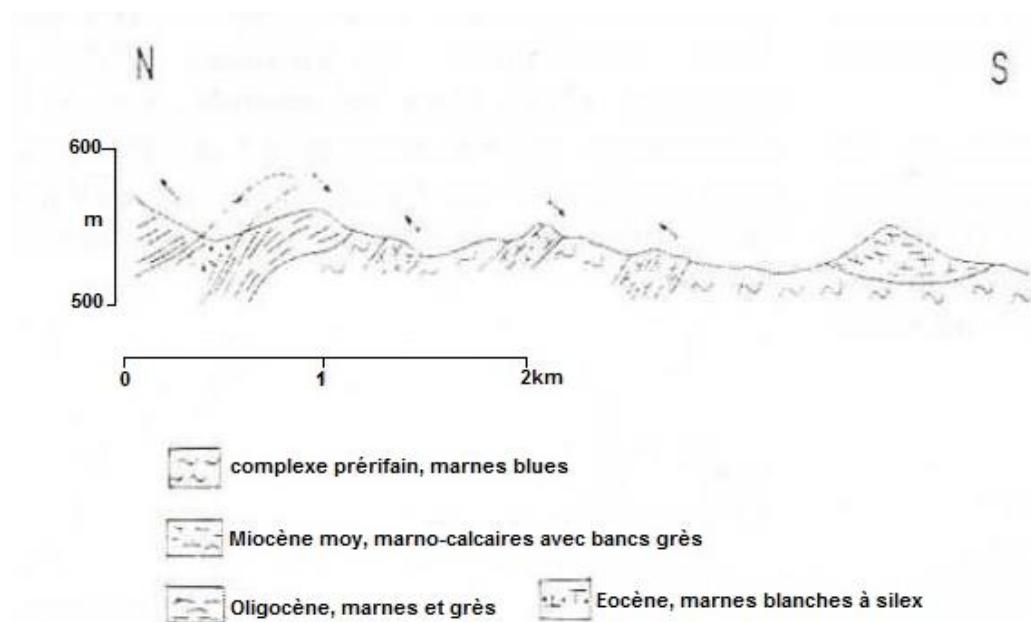


Figure 13 - Coupe géologique dans le Prerif, zone de Sebt Boukellal, (D Leblanc, 1976)

4-1-2- Sillon Sud Rifain

Le détroit sud-rifain comporte essentiellement des marnes miocènes discordantes sur les structures moyen-atlasiques au S, et surmonté par le Complexe prérifain au N. Classiquement le Miocène du sillon se subdivise en trois niveaux (LEBLANC, 1971, d’après BOUCHTA EF. 1983) :

- Miocène anté-nappes : mollasse de base (Burdigalien).
- Miocène synchrone à l’arrivée des terrains charriés (Tortonien).
- Miocène post-nappes (Messinien) (MICHARD, 1976).

Ainsi, les marnes du compartiment affaissé au sud de Tahla sont attribuées au Messinien, de même que plusieurs lambeaux de marnes isolés (Koudiat Ad Douiz, Mers-et-Tria). Plus au nord, le même Messinien est surmonté par le mélange prérifain.

Le sillon renferme aussi des formations quaternaires, comme les dépôts fluviaux de l’Oued Inaouène qui s’organisent dans des terrasses fluviales dont la disposition est généralement semi-emboîtée. On trouve aussi des travertins témoignage d’accumulations biochimiques attribués aux sources karstiques. Les principaux affleurements travertineux se rencontrent en Taza-Haut, et ceux qui coiffent Koudiat Karn Nasrani et Koudiat Mimouna, et les travertins qui tapissent les cascades au pied de Ras El Ma. Vers la zone de Bouhlou une lave volcanique

basaltique descendant du cône de Bab Azhar à l’époque de quaternaire ancien, forme une lobe près de l’Oued Inaouène a pu divier son tracé vers les fomations du Prerif en créant une large méandre.

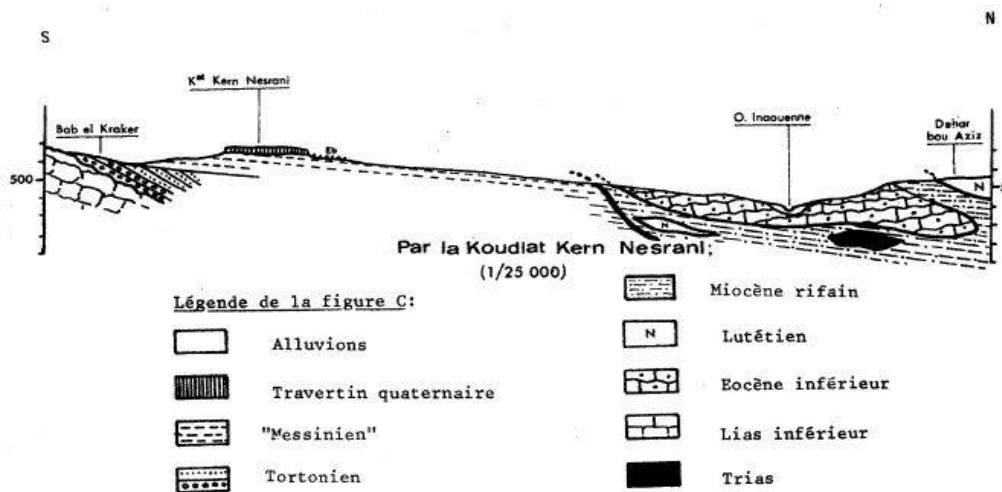


Figure 14 - Coupe géologique dans le sillon sud-rifain (d'après ROBILLARD, 1978)

4-1-3- Moyen-Atlas septentrional

Le Moyen-atlas est caractérisé par une structure diversifiée rassemblant à la fois les reliefs plissés, les structures sub-tabulaires , et les déformations cassantes (failles).

Stratigraphiquement, il montre une grande lacune allant du Jurassique moyen jusqu'à la fin du Miocène.

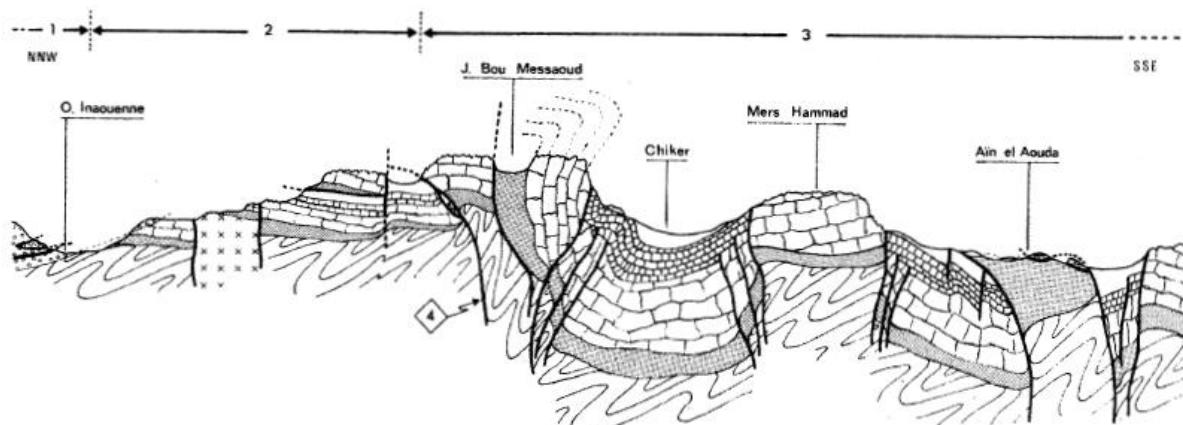
Selon ROBILLARD (1978), le Moyen-atlas se subdivise en trois parties:

- le massif primaire du Tazekka,
- le Causse moyen-atlasique
- le Moyen-atlas plissé.

Ainsi, le massif primaire de Tazekka, allongé suivant une direction NE-SW parallèlement à l’orientation générale du Moyen-atlas, comprend des schistes, des quartzites, des grès et des microgranites et surmonté par un complexe volcanique andésitique attribué au Viséen supérieur. La couverture secondaire qui l’encercler lui donne le caractère d’une bottonnière (BOUCHTA EF, 1983). Les couches secondaires sont constituées d’argiles et de basaltes permo-triasiques surmontés par les calcaires et dolomies du Lias, et elles connaissent un basculement à proximité de Tazekka à la suite de son soulèvement au début du Tertiaire.

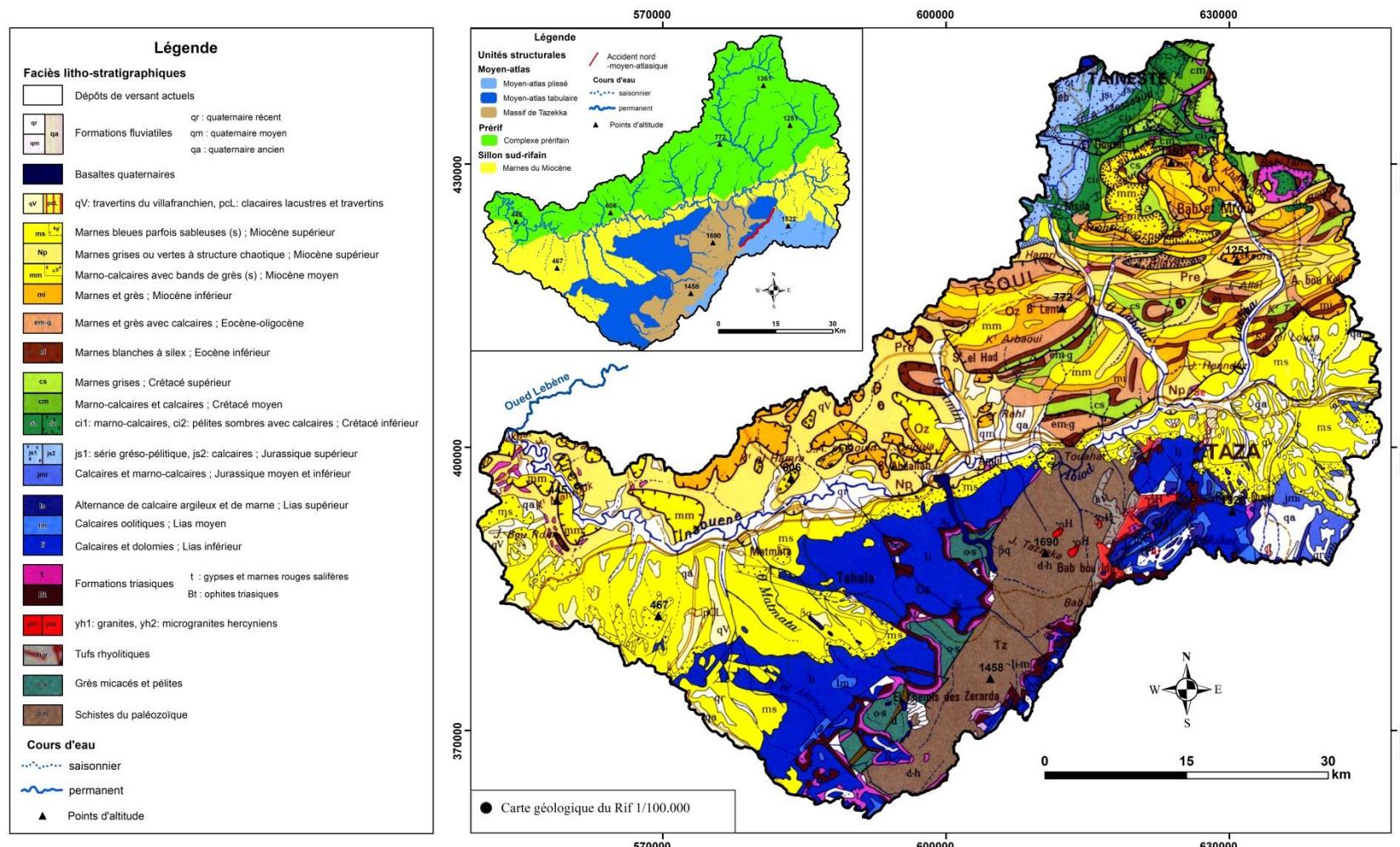
Dans l’autre côté du Moyen-atlas, la chaîne se subdivise en deux grands ensembles structuraux : la causse moyen-atlasique de structure subtabulaire s’affronte avec le Moyen-atlas plissé suivant une ligne architecturale majeure appelée l’accident nord-moyen-atlasique (selon G. Colo, 1961), un accident à caractère cisaillant, localement chevauchant au NW. L’observation de la carte géologique montre que le terrain est haché par un réseau de failles de différentes directions.

Les formations liasiques constituent la majorité du terrain. Elles sont composées de marno-calcaires du Lias supérieur et de calcaires et dolomies dans le Lias et moyen et inférieur. A l’extrême Est du bassin les formations du Jurassique s’affleurent sous forme de montagnes moyennement élevées comme Jbel Lmoula constituées par des marno-calcaires, et des séries gréso-pélitiques et de calcaires dans le Jurassique supérieur. Un complexe typique forme aussi la géologie du terrains. Il s’agit du Complexe basaltique, cantonné dans la formation argileuse rouge attribuée au Permo-Trias, qui forme des coulées à structure doléritique noyant la topographie des argiles rouges ravinées sous-jacentes (ROBILLARD, 1978).



*Figure 15– Coupe schématique, interprétative et composite dans le Moyen-atlas
(d’après ROBILLARD, D. 1978)*

[Miocene pattern]	Miocène
[Upper Lias pattern]	Lias supérieur
[Middle Lias pattern]	Lias moyen
[Lower Lias pattern]	Lias inférieur
[Permo-Trias pattern]	"Permo-trias"
[Micro-granite pattern]	"micro-granite"
[Primary Basement pattern]	Socle primaire
	4 → Accident nord moyen-atlasique.
	3 → Moyen-Atlas plissé.
	2 → Causse moyen-atlasique.
	1 → Prérif + Détroit sud-rifain.



Carte 7 – Répartition spatiale des faciès lithostratigraphiques du bassin d'Inaouène

4.2- Perméabilité du terrain

La connaissance de la perméabilité du bassin est la clé pour mieux comprendre la réaction hydrologique face aux pluies. Dans un bassin perméable, les nappes souterraines sont abondantes et assurent le soutènement des cours d'eau lors de la période sèche et en contrepartie les crues seront moins fortes du fait de l'infiltration des eaux. En revanche, dans un bassin imperméable les étiages sont creux vu l'absence des nappes et en même temps les crues sont de plus en plus dévastatrices et brèves.

Pour caractériser le comportement hydrogéologique du bassin (perméabilité), on peut se baser sur la classification de l'O.R.S.T.O.M (P. DUBREUIL et J. GHISCAFRE, 1971) qui permet de distinguer trois types de formations selon le degré de perméabilité des roches : *les formations perméables, les formations semi-perméables, et les formations imperméables*.

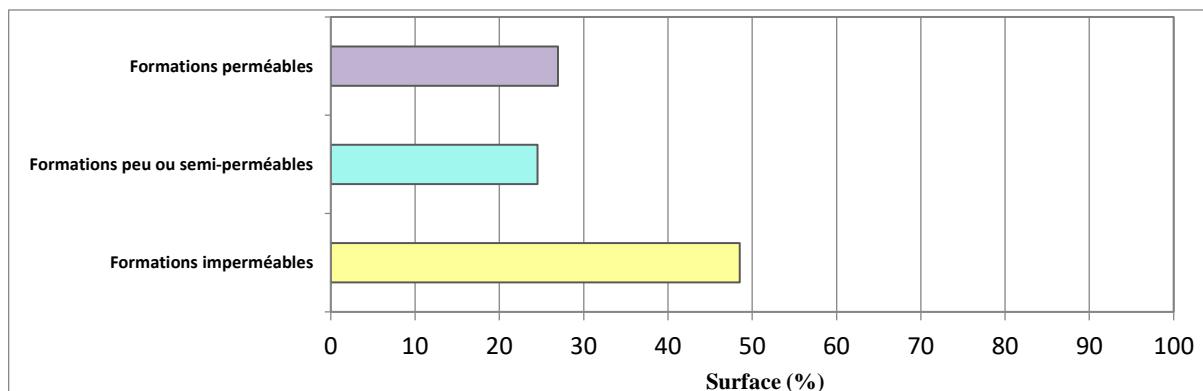
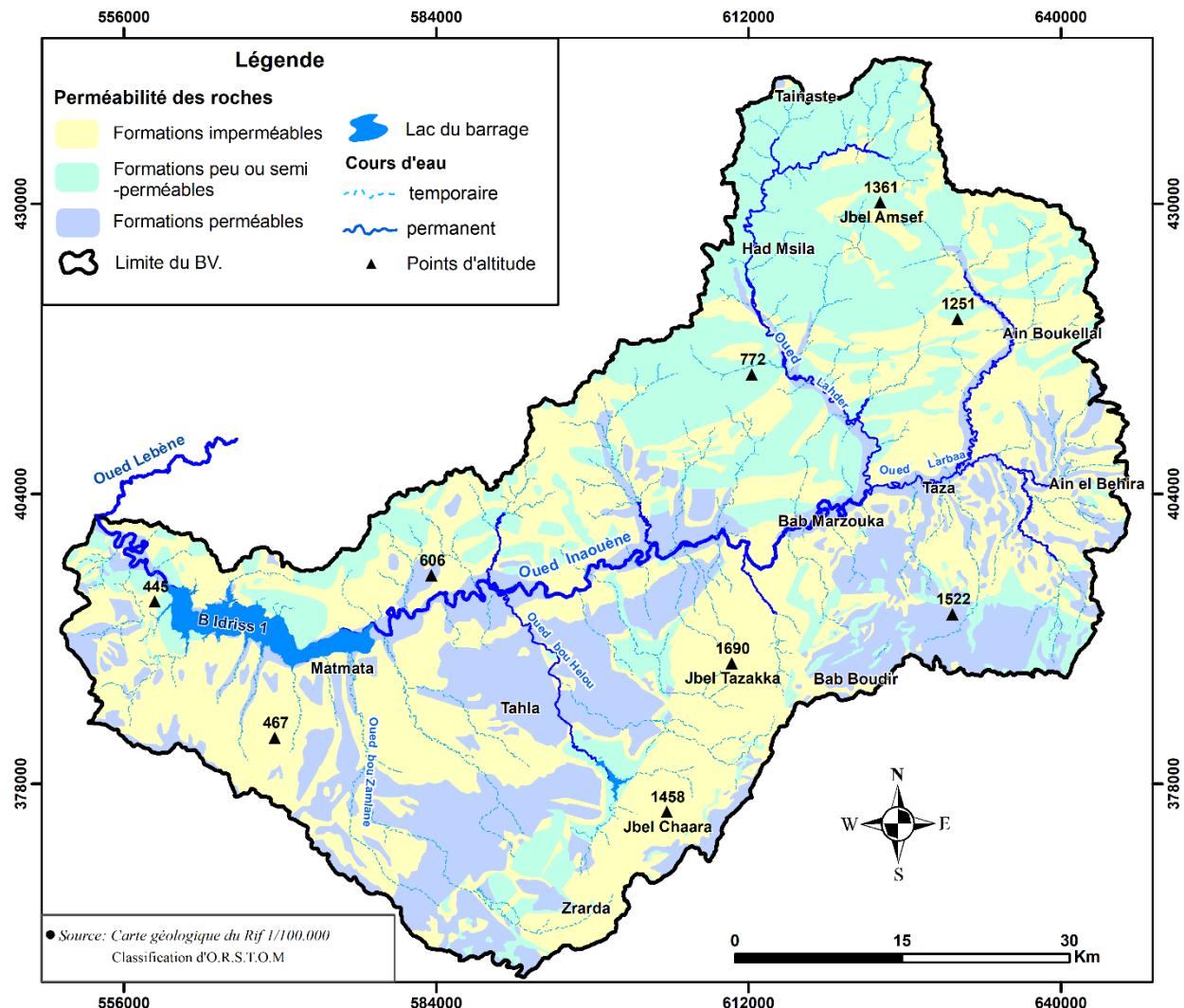


Figure 16 - La superficie (en %) des types de faciès rocheux selon leur perméabilité

En gros, le bassin d'Inaouène se caractérise par l'abondance des formations imperméables (environ 50% de la superficie du bassin) parce que son substrat est formé essentiellement par les marnes, et les roches métamorphiques imperméables, même s'elles sont d'extension étroite, comme les schistes, les ophites. Ces formations favorisent le ruissellement et empêchent la constitution des nappes ce qui se répercute sur le plan hydrologique par la violence des crues et l'émergence précoce des étiages qui seront plus longs et sévères. Cependant, le bassin dispose aussi des formations perméables comme les calcaires, dolomies (due à la tectonique) qui s'affleurent largement dans Moyen-atlas en favorisant la pénétration des eaux pluviales et la reconstitution des aquifères surtout au niveau des structures tabulaires où le relief constitue des plateaux permettant la stagnation des eaux en-dessus et leur infiltration vers la profondeur. L'existence des aquifères présente un avantage au niveau hydrologique parce qu'elles soutiennent les cours d'eau dans la période sèche et assouplissent la sévérité des étiages.



Carte 8 – Perméabilité des roches du bassin d'Inaouène

5- Morphométrie du bassin versant et de son réseau hydrographique

5-1- Géométrie du bassin

Les caractéristiques géométriques du bassin-versant comme la superficie, la forme, sont des éléments indispensables pour mieux connaître le comportement hydrologique. Les débits liquides écoulés à l'exutoire d'un bassin dépendent en partie de sa surface, puisque ce dernier représente l'aire de réception des précipitations et d'alimentation du cours d'eau. Cette surface est facilement mesurée à l'aide des SIG.

De même, la forme du bassin a des conséquences hydrologiques importantes, en particulier sur le transfert de l'eau et alors sur l'allure de l'hydrogramme obtenu à l'exutoire. Il existe différents indices morphologiques qui permettent de caractériser la forme du bassin. On en retient là l'indice de compacité de Gravelius KG et l'indice de forme de Horton Ic. Le bassin est ramassé

(ou circulaire) si K_G est proche de 1, tandis qu'il est allongé si K_G s'approche de 1,5. Selon l'indice de Horton, le bassin est de forme allongée si I_c est inférieur à 1 et tend à être ramassé s'il y est supérieur.

Les indices de forme utilisés montrent que le bassin d'Inaouène jusqu'à la confluence avec l'oued Lebène présente une forme allongée. Dans ce cas, le temps de concentration des eaux sera élevé et les eaux prennent alors beaucoup de temps pour arriver à l'exutoire et par conséquent les crues seraient de plus en plus faibles.

Tableau 11 – Paramètres morphométriques du bassin d'Inaouène

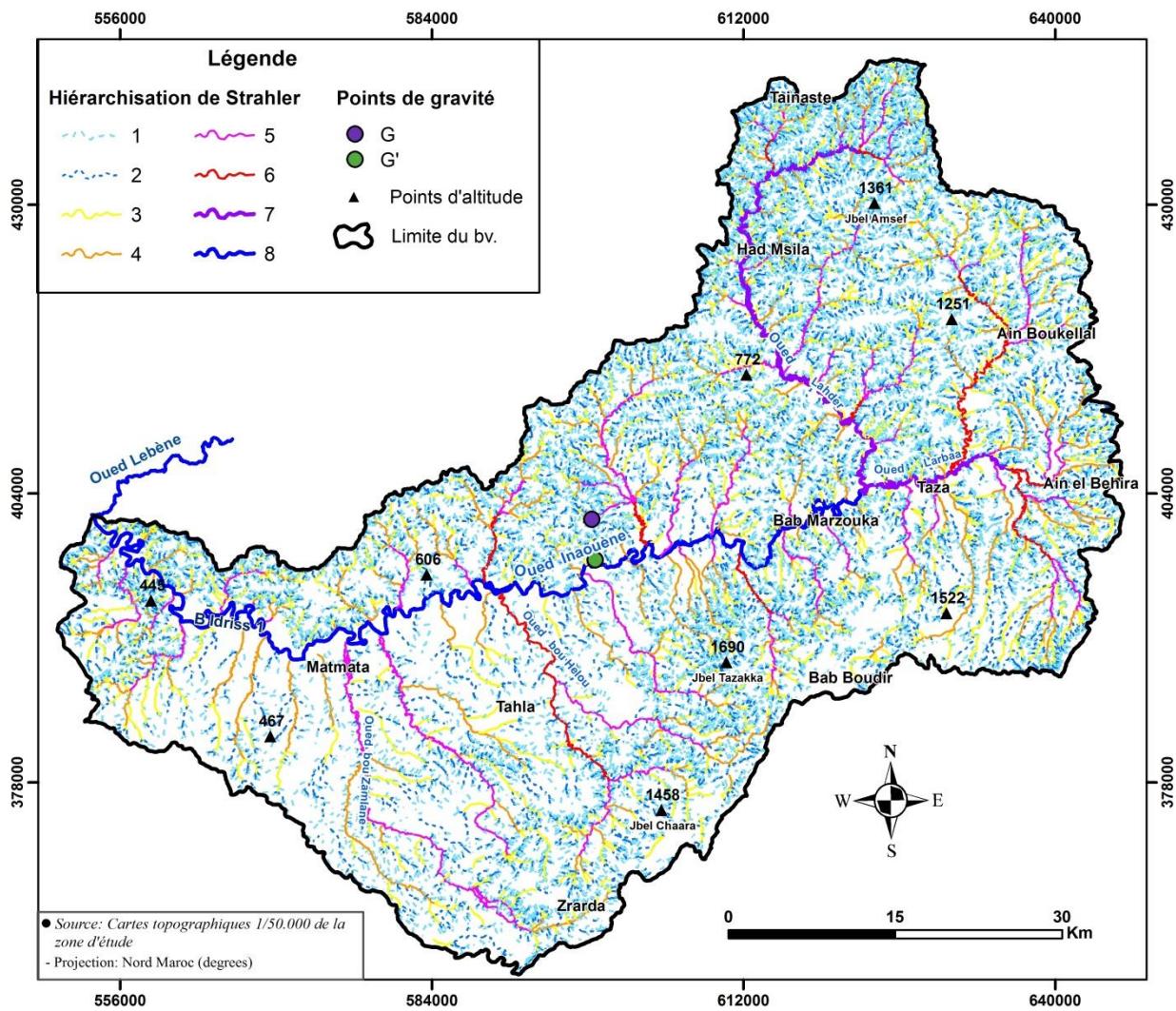
Paramètres morphométriques	Mode de calcul	BV Inaouène
Superficie (km^2)	Digitalisation numérique sur SIG	3710
Périmètre (km)		385
Indice de compacité de Gravélius (K_G)	$K_G = 0,28 * (P/\sqrt{S}) = \frac{P}{2 \times \sqrt{\pi} \times S}$ P : périmètre du bassin (km) S : surface du bassin (km^2)	1,76 Forme allongée
Indice de compacité de Horton (K_H)	$K_H = S / L^2$ S : surface du bassin (km^2) L : longueur du cours principal	0,09 Forme allongée
Longueur du rectangle équivalent (L) en (km)	$L = \frac{KG\sqrt{S}}{1,12} * (1 + \sqrt{1 - (1,12/KG)^2})$	169,5
Largeur du rectangle équivalent (l) en (km)	$L = \frac{KG\sqrt{S}}{1,12} * (1 - \sqrt{1 - (1,12/KG)^2})$	21,8

5-2- Réseau hydrographique et sa morphométrie

5-2-1- Hiérarchisation du réseau hydrographique

De façon générale, la hiérarchie du réseau hydrographique se manifeste par l'importance croissante de ses éléments, depuis les ramifications originelles de l'amont dépourvues de tributaires jusqu'au collecteur principal. Plusieurs systèmes de numérotation ont été conçus pour ordonner le réseau hydrographique. Le plus utilisé c'est la classification de A. N. Strahler (1952). Cette classification définit un ordre des tronçons des thalwegs à partir de la règle suivante :

- tous cours d'eau n'ayant pas d'affluents est dit d'ordre 1 ;
- au confluent de 2 cours d'eau de même ordre (n), le cours résulte est d'ordre n+1 ;
- un cours d'eau (n) recevant un affluent d'ordre inférieur, garde son ordre (n).



Carte 9 – Hiérarchisation du réseau hydrographique selon le système de Strahler

Le tracé en plan du réseau hydrographique du bassin du Haut Inaouène établi à partir des cartes topographiques 1/50.000 couvrant la zone d'étude montre que l'ordre supérieur du bassin versant d'Inaouène égale à 8. Mais cet ordre ne conforme pas l'ordre réel sur le terrain. Des études ont été effectuées sur des bassins versants en France ont pu établir une échelle permettant de corriger l'ordre et de définir la correspondance moyenne entre l'ordre lu sur la carte et l'ordre réel relevé sur les photo-aériennes (J.P. Laborde 2000). Selon cette échelle l'ordre supérieur obtenu à l'oued Inaouène jusqu'à sa confluence avec l'oued Lebène égale à 10.

Tableau 12- Correspondance entre l'ordre réel et l'ordre obtenu à partir des cartes topographiques

Echelle de la carte topographique	Ordre lu sur la carte	Ordre réel
1/ 20 000	1	2
1/ 50 000	1	3
1/ 100 000	1	4
1/ 200 000	1	5

5-2-2- La densité de drainage (Dd)

La densité de drainage est un indicateur important de la concentration du ruissellement en hiver, et de l'ampleur du tarissement des cours d'eau en été. Cet indice varie d'un bassin à l'autre voire dans le même bassin d'un secteur à l'autre, selon le degré de perméabilité des terrains, les caractéristiques topographiques du bassin et suivant les conditions bioclimatiques et pédologiques. La densité de drainage (Dd) est définie comme étant la longueur totale des éléments du réseau hydrographique Li (en km) par unité de surface du bassin versant A (en km^2) :

$$\mathbf{Dd = Li / A}$$

La densité de drainage d'ensemble du bassin d'Inaouène est de l'ordre de 3, 3 km/km^2 . Elle est très élevée et elle traduit, en effet, un bon drainage d'ensemble et un réseau hydrographique dense. La valeur de cet indice hydro-morphométrique est liée à la faible perméabilité du terrain, la dégradation du couvert végétal du bassin d'Inaouène et bien entendu à la pluviosité du climat.

Sur le plan hydrologique, on peut constater que la réponse hydrologique du bassin face aux pluies sera rapide. Au moment des averses, les crues qui se produisent seront fortes, rapides et brèves parce de tout ce qui tombe de pluies ruissellent sans s'infiltrer. Il faut noter là que la densité de drainage dans les sous-bassins du Prérif est très élevée par rapport à celle des sous-bassins issus du Moyen-atlas.

5-2-3- Longueur et pente moyenne de cours d'eau principal

Ces deux paramètres ont intérêt particulière dans le domaine de l'hydrologie parce qu'ils expliquent le temps de transfert et d'évacuation des eaux de pluies à l'exutoire. La longueur du cours d'eau principal (L) est définie comme étant la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux. A partir de cette longueur on peut déterminer la pente moyenne du cours d'eau principal consistant à diviser la différence d'altitude entre ses points extrêmes (ΔH en m) par sa longueur totale (L en km) :

$$P_{moy} = \Delta H_{max} / L$$

Tableau 13 - Caractéristiques du cours d'eau principal

Dénivellation maximale du cours (Hmax en m)	Longueur totale (km)	Pente moyenne (m/km)
1496	197,7	7,5

La pente moyenne du cours d'eau de l'oued Inaouène est de l'ordre de 7,5 m/km (soit **0,75%**), donc cela veut dire que *l'altitude du plan d'eau* du cours principal baisse de 7,5m chaque fois que le cours d'eau parcourt 1000m. A partir de cette valeur on constate que la pente moyenne est généralement faible, et en conséquence la vitesse d'évacuation des eaux fluviales sera faible.

Tableau 14 – Classe des pentes le long d'un cours d'eau (GARTET, J. 2010)

Vitesse des eaux	Pente (%)
<i>Faible</i>	< 1
Modérée	1 < P < 10
Forte	6 < P < 10
Très forte	P > 10

Conclusion du chapitre

D'après l'analyse spatiale du milieu physique du bassin versant d'Inaouène on peut constater la diversification des composantes physiques à l'échelle spatiale et aussi temporelle. Certaines parties du bassin portent des caractéristiques ne peuvent qu'à favoriser un écoulement dense et important et d'autres sont censés entraver l'écoulement superficiel en faveur d'une concentration souterraine.

A l'échelle du bassin d'Inaouène on peut distinguer deux unités spatiales très contradictoires. Il s'agit bien là des bassins-versants issus du Moyen-Atlas et ceux du Prerif qui se rejoignent pour alimenter l'écoulement de l'oued Inaouène qui draine la section la plus basse du bassin, celle de sillon sud-rifain. Les premiers sont caractérisés par un relief un peu élevé et reçoivent

par conséquent des cumuls pluviométriques importants qui partent en portion importante à l'écoulement fluvial grâce à la dominance des roches perméables (calcaires, dolomies). Les affluents issus de ces bassins jouent un rôle important dans le soutènement de l'écoulement fluvial de l'oued Inaouène en période de sécheresse. En contrepartie, il y a les sous-bassins-versants issus du domaine préfain qui se caractérisent par une densité hydrographique très élevée du fait de l'existence d'un réseau hydrographique dense favorisé par la friabilité des faciès rocheux (marne). Les cours d'eau issus des bassins préfains assurent une alimentation rapide de l'écoulement d'Inaouène en période de pluies alors qu'ils tendent à se tarir en période de sécheresse.

On peut conclure que le bassin d'Inaouène et grâce à ses particularités physiographiques tend à avoir un fonctionnement équilibré et diversifié de son écoulement pendant les périodes de l'année. En effet, les cours d'eau issus du domaine préfain assure une alimentation rapide et consécutive pendant les périodes des pluies (oued Lahder). En contrepartie, les cours d'eau issus du Moyen-atlas soutiennent l'oued Inaouène en période de tarissement hydrologique du fait de l'abondance des aquifères souterraines (cas du bassin de l'oued Taza).

Chapitre 2

Cadre humain du bassin Inaouène

Sommaire

Introduction

1- Découpage administrative

2- Evolution démographique

2-1- Population recensée

2-2- Taux d'évolution moyen annuel

3- Densité humaine

4- Interventions anthropiques et effets sur l'écoulement

4-1- L'imperméabilisation du bassin

4-2- L'effet des aménagements hydrauliques

4-3- Exploitation des ressources hydriques

Conclusion

Introduction

L'être humain est le principal facteur à prendre en considération dans l'étude de l'hydrologie des cours d'eau. En effet, l'homme intervient au niveau des bassins-versants en contrôlant les usages des terres et la mise en place des aménagements qui peuvent parfois avoir un effet majeur sur les ressources en eau du bassin.

Au niveau du bassin versant d'Inaouène l'effet de l'intervention humaine sur le régime naturel de l'oued Inaouène se conçoit clairement en raison de la mise en place des grands ouvrages hydrauliques (barrage Idriss 1, Bab Louta) qui impactent considérablement sur la production des inondations naturelles en aval. Cependant, les formes d'intervention sont multiples et peuvent avoir soit un effet direct soit indirect sur les ressources en eau du bassin.

L'objectif de cet axe sera de visualiser l'état d'anthropisation du bassin d'Inaouène grâce à l'utilisation des indices et données démographiques. De plus, une mise en lumière sur les principales influences de l'homme dans la dynamique de l'écoulement sera également appréciée.

1- Découpage administrative

Le territoire du bassin versant d'Inaouène appartient à la région de Fès-Meknès, il occupe aussi le territoire quatre provinces et une préfecture : Taza, Taounate, Sefrou, Guercif et Fès.

A l'échelle communale, on a compté environ 42 communes dont le territoire fait partie du territoire du bassin d'Inaouène. Cependant, seules les 14 communes qui s'insèrent totalement dans le terrain d'Inaouène alors que les 28 communes n'en font partie que de façon partielle.

Les communes de Ghiata Al Gharbia, Smiaa, et Galdamane sont les communes rurales qui occupent la plus grande surface dans le bassin d'Inaouène avec une superficie de 680, 6 km². En revanche, les communes rurales et villageoises sont généralement les plus petites en termes de surface, comme la ville de Taza, le grand pôle urbain dans le bassin d'Inaouène ne couvre qu'une superficie de 23,4 km².



Carte 10 – Découpage administrative au sein du bassin-versant d’Inaouène

2- Evolution démographique

L'étude démographique des communes de bassin du Haut Inaouène est basée sur les données de recensements généraux de la population et de l'habitat (2004 et 2014) pour les 43 communes faisant partie du territoire du bassin.

2-1- Population recensée

Le nombre total de la population de toutes les communes appartenant (totalement ou partiellement) au bassin d'Inaouène était de l'ordre de 620747 habitants selon le recensement de 2004 en contrepartie d'un nombre de 603264 habitants en 2004. La plupart d'entre elles a connu un taux d'accroissement moyen annuel négatif, seules douze parmi quarante-deux communes qui ont connu un taux de croissance positif, en l'occurrence Taza, Tahla, Oued Amlil, Tainaste,...On peut constater alors que le bassin d'Inaouène est territoire répulsif à la population à cause d'une ou plusieurs contraintes soit d'ordre naturel comme la rigidité du

relief, la sécheresse, manque d'eau... ou bien d'ordre socio-économique (pauvreté, chômage...) qui poussent les gens à immigrer.

2-2- Taux d'évolution moyenne annuel (TAMA)

Le taux d'évolution moyen annuel est un bon indicateur pour savoir et qualifier l'évolution en nombre d'une population donnée. L'utilisation du TAMA est basée sur les deux derniers recensements (2004 et 2014) de la population marocaine. Son application à l'échelle des communes du bassin d'Inaouène montre de grandes différences en matière de l'évolution démographique dans les différentes zones du bassin.

Certaines communes sont distinguées par une évolution démographique positive. Celles-ci sont souvent des communes urbaines (cas de la ville de Taza, Ouad Amlil, Tahla) ou bien des centres villageois (Taisante). Cependant, la majorité des communes du bassin d'Inaouène subissent à une évolution négative de la population ce qui les qualifie de zones d'expulsion du fait de l'absence des potentiels socio-économiques et la sévérité des conditions naturelles (difficulté d'accès, sécheresse...)

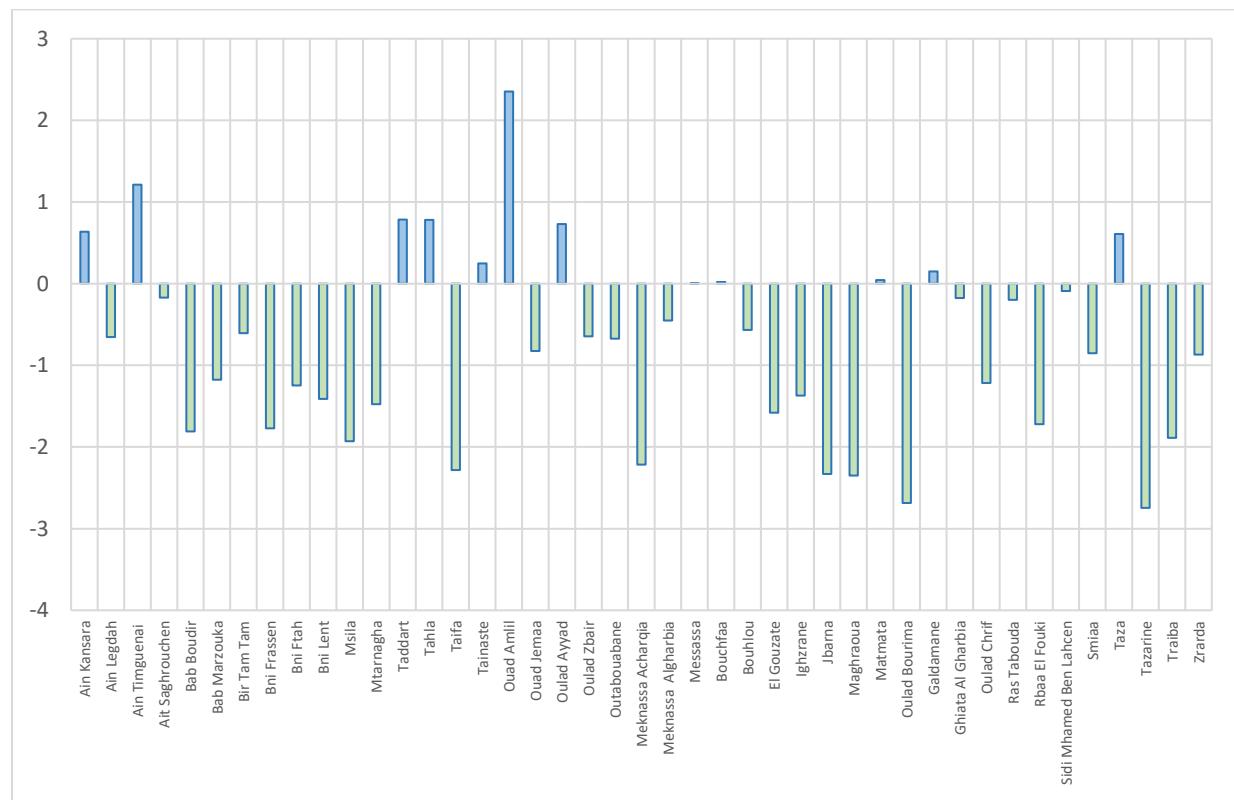
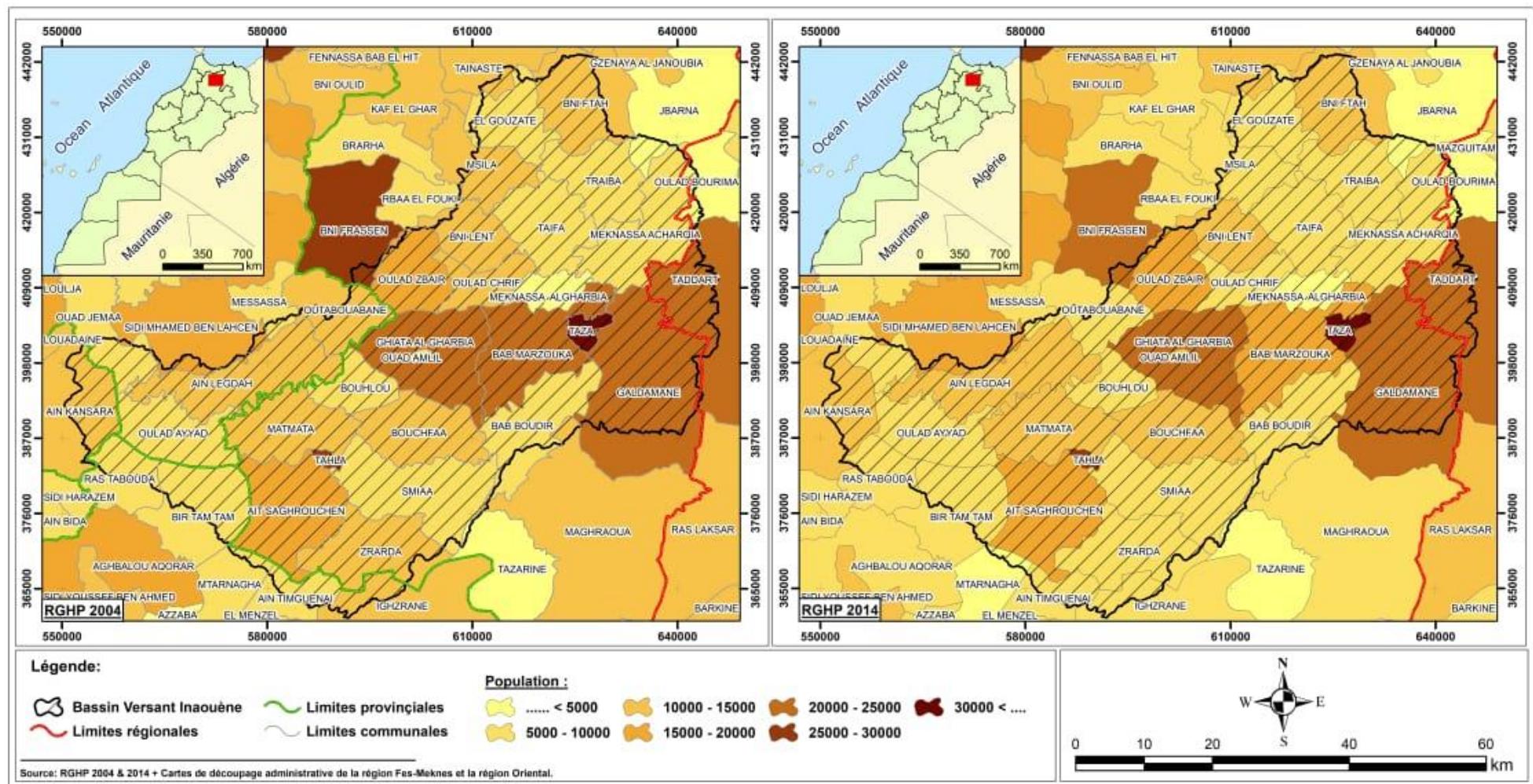
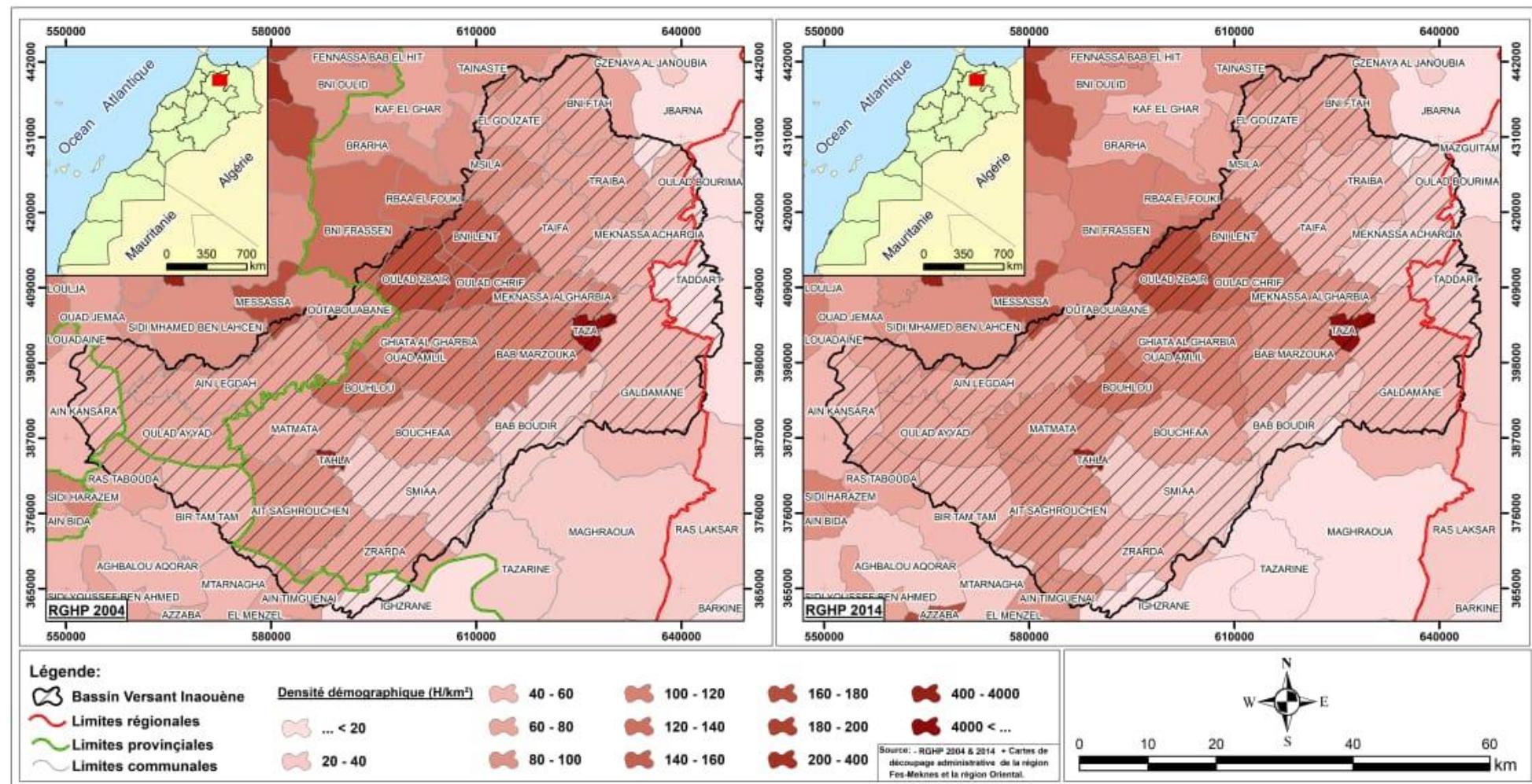


Figure 17 – Taux d'évolution moyenne annuel (TAMA) des communes du bassin-versant d'Inaouène



Carte 11+12 – Evolution de la population des communes du bassin d’Inaouène dans les deux derniers recensements (2004-2014)



Carte 13 + 14 - Densité humaine dans les communes du bassin d'Inaouène selon les deux derniers recensement (2004-2014)

3- Densité humaine

La densité de population dans un territoire donné, est le rapport entre le nombre de cette population et la surface de son territoire, et s'exprime en nombre d'habitants par unité de surface, le plus souvent en km². C'est un bon instrument d'analyse descriptive de la répartition d'une population et de connaître les principales zones de concentration humaines.

Le calcul de la densité humaine dans le bassin versant d'Inaouène (carte 13 et 14) a permis de constater que les associations humaines se concentrent d'une façon inégale dans le bassin et que les zones de surpeuplement s'excluent seulement au niveau des communes urbaines comme Taza, Tahla, Oued Amlil. En fait, les zones urbaines constituent des lieux attractifs en vue de la disposition des conditions socio-économiques (travail, l'enseignement,).

Tableau 15– Densité démographique du bassin d'Inaouène

Communes	Population 2004	Population 2014	Surface (km ²)	Densité H/km ² 2004	Densité H/km ² 2014
Ain Kansara	11534	12291	229	50	54
Ain Legdah	12196	11422	190	64	60
Ain Timguenai	5778	6519	77	75	85
Ait Saghrouchen	16362	16085	195	84	82
Bab Boudir	6100	5082	158	39	32
Bab Marzouka	20846	18520	192	109	97
Bir Tam Tam	9714	9141	171	57	54
Bni Frassen	28014	23429	202	139	116
Bni Ftah	12378	10919	181	69	60
Bni Lent	13678	11866	89	154	133
Msila	10153	8356	120	85	70
Mtarnagha	5284	4554	126	42	36
Taddart	20474	22138	1046	20	21
Tahla	25655	27729	8	3157	3412
Taifa	8808	6992	140	63	50
Tainaste	11246	11530	122	92	95
Ouad Amlil	8246	10405	5	1708	2155
Ouad Jemaa	9983	9190	149	67	62
Oulad Ayyad	8896	9566	132	67	73
Oulad Zbair	18933	17747	108	176	165
Outabouabane	10545	9856	118	89	83
Meknassa Acharqia	7532	6020	184	41	33
Meknassa Algharbia	4070	3890	48	86	82
Messassa	9497	9501	58	164	164
Bouchfaa	10703	10724	147	73	73
Bouhlou	9259	8748	72	129	122
El Gouzate	7710	6575	107	72	61
Ighzrane	11050	9626	730	15	13
Jbarna	3456	2730	230	15	12
Maghraoua	10406	8204	513	20	16
Matmata	11874	11928	149	80	80
Oulad Bourima	1951	1486	99	20	15
Galdamane	21111	21433	379	56	57
Ghiata Al Gharbia	23447	23038	203	116	114
Oulad Chrif	10439	9237	73	143	127
Ras Tabouda	6516	6388	94	69	68
Rbaa El Fouki	8498	7144	69	123	103
Sidi Mhamed Ben Lahcen	18990	18820	212	90	89
Smiaa	8099	7435	211	38	35
Taza	139686	148456	23	5954	6328
Tazarine	3465	2623	163	21	16
Traiba	8073	6672	126	64	53
Zrarda	10092	9249	161	63	57

4- Interventions anthropiques et effets sur l'écoulement

De façon générale, l'influence anthropique (urbanisation, défrichement, utilisation des terres...etc.) se répercute sur les ressources en eau et sur l'imperméabilisation des surfaces dans le bassin versant, et affecte leur comportement hydrologique. Généralement, l'influence anthropique peut être schématisée par la figure suivante :

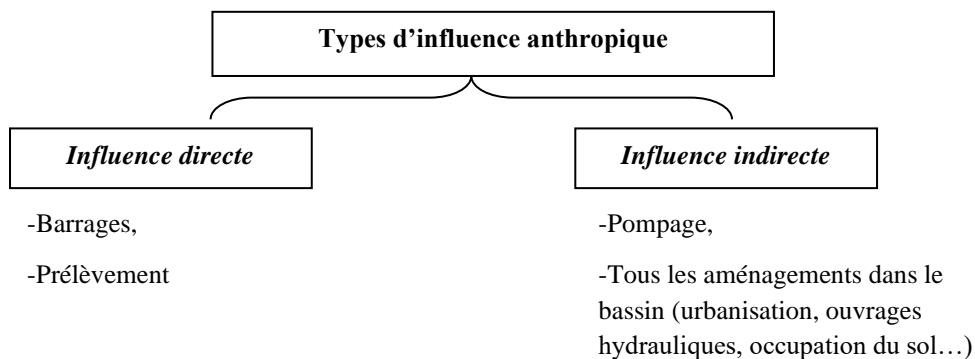


Figure 18 – Types d'influence anthropique sur le plan hydrologique

4-1- L'imperméabilisation du bassin

L'urbanisation croissante dans le bassin d'Inaouène a pour effet d'augmenter le ruissellement et croître, en conséquence, les débits de pointe des cours d'eau au moment des crues. En réduisant considérablement le temps de concentration de l'écoulement, l'imperméabilisation artificielle liée à l'urbanisation réduit les infiltrations et donc la recharge des nappes souterraines qui ne peuvent plus soutenir les écoulements de base des cours d'eau. En effet, quand on observe les cours d'eau passant par la ville de Taza comme les oueds Taza, Jâouna, Dffali et le Ruiregh, leur réponse hydrologique face aux pluies est très vite et les crues sont immédiatement enregistrées.

4-2- L'effet des aménagements hydrauliques

Les aménagements hydrauliques perturbent largement l'hydrologie des cours d'eau. Les barrages, par leurs effets de laminage, jouent un rôle évident et déterminant dans la perturbation du comportement hydrologique naturel des rivières. Leurs impacts hydrologiques se distinguent nettement sur les hydrogrammes et se soldent grossièrement par une réduction nette du volume d'eau annuel écoulé à l'aval et par la diminution de la fréquence des fortes crues (A. TAOUS,

2005). Leur influence affecte aussi la dynamique fluviatile puisqu'il crée un niveau de base local qui freine le cours d'eau et lui impose de déposer sa charge liquide et solide. Deux barrages ont été installés dans le bassin d'Inaouène, le premier c'est le barrage d'Idriss Premier sur l'oued Inaouène et le deuxième est le barrage de Bab Louta situé sur l'oued Bousbâa, affluent de l'oued Bou Hlou qui débouche lui-même à l'oued Inaouène.

Barrage Idriss Premier (oued Inaouène)



Photo 1 - Barrage hydraulique Idriss Premier (oued Inaouène)

Barrage Bab Louta (oued Bousbâa)



Photo 2 – Barrage hydraulique Bab Louta (oued Bousbâa)

Tableau 16 – Caractéristiques des barrages hydrauliques du bassin d'Inaouène (Idriss Premier et Bab Louta)

<i>Données caractéristiques du barrage Idriss 1er</i>	<i>Données caractéristiques du barrage Bab Louta</i>
-Année de mise en service	1973
-Cours d'eau	Inaouène
-Capacité de la retenue	1186 Mm ³
-Cote de retenue normale	217 NGM
-Hauteur	72 m
-Volume	450.000 m ³
-Année de mise en service	1999
-Cours d'eau	Bousbâa
-Capacité de la retenue	37 Mm ³
-Apports moyens annuels	23 Mm ³
-Hauteur	55 m
-Volume	45.000 m ³

En effet, dès la mise en place du barrage Idriss Premier en 1973 sur l'oued Inaouène, le régime d'écoulement de Sebou a enregistré un déficit hydrologique d'environ 54% au niveau de la station d'Azib Soltane, située en aval du barrage. De même, depuis sa mise en service, la fréquence de certaines fortes crues a nettement diminué en aval, notamment pour celles dont

les périodes de retour sont comprises entre 10 et 20 ans (K. El Ghalbi, 2001, d'après A. TAOUS, 2005) ; les crues dont les débits sont supérieurs à 537 m³/s deviennent rares, voire absentes parce que le régime hydrologique est contrôlé par le mode de gestion du barrage.

De même, le barrage de Bab Louta a aussi influencé sur les débits de l'oued Inaouène et particulièrement au niveau de la station d'El-Kouchat puisqu'il collecte des eaux arrivant d'une zone humide. Les crues fréquentaient l'oued Inaouène à El-Kouchat avant sa mise en service en 1999 étaient fortes.

4-3- Exploitation des ressources hydriques

Deux formes d'exploitation des ressources en eau dans le bassin :

-l'exploitation des ressources en eau superficielles ; comme les eaux fluviales, les eaux des sources. En effet, les sources sont souvent exploitées par l'homme pour des besoins différents mais souvent pour l'eau potable et dans des cas pour des raisons agricoles (l'irrigation) comme ce qu'on voit au niveau de la source de Ras El Ma où une grande partie des eaux de la source se conduit pour l'irrigation des parcelles. En outre, il y a le prélèvement des eaux fluviales qui influence aussi sur les débits enregistrés à l'exutoire. Par exemple, le long de l'oued Inaouène on observe des cultures importantes irriguées grâce aux eaux de l'oued.

-l'exploitation des eaux souterraines ; qui se concrétise essentiellement dans les puits d'eau. En effet, un grand nombre de puits est observé dans le bassin d'Inaouène qui a pour effet le tarissement des nappes phréatiques surtout quand il y en a une surexploitation, et par conséquent les cours d'eau ne seront plus soutenus au moment des étiages.

Conclusion du chapitre

A partir des données démographiques et observations des utilisations des terres dans le bassin d'Inaouène il s'avère que la densité démographique moyenne sur la totalité du bassin est faible. Les principales zones de concentration humaine se limite au niveau des villes (Taza, Ouad Amlil, Tahla) et certains centres villageois comme Taisante, Had Msila, Galdamane, ...

Celles-ci ont bien souvent un taux d'évolution annuel positif avec une densité humaine importante.

Les interventions anthropiques dans le bassin versant d'Inaouène sont multiples et peuvent affecter l'écoulement de façon directe ou indirecte. L'urbanisation accroissante dans les communes urbaines comme Taza constituent des plateformes favorables au ruissellement de surface et l'alimentation des cours d'eau en eau usée, comme le cas de la ville de Taza dont les effluents débouchent à l'oued Larbaa, ce qui affecte le régime naturel du tarissement en période de sécheresse. A côté, il y a des effets des barrages hydrauliques comme le barrage de Bab Louta mis sur l'oued Bousbaâ qui affecte la quantité d'eau arrivant au cours d'Inaouène. D'autres initiatives humaines peuvent aussi avoir un effet indirect sur les ressources en eau fluviale, en l'occurrence le reboisement qui a pour effet de régulariser l'écoulement en favorisant l'infiltration et par la suite la recharge des nappes.

Conclusion de la Première Partie

A partir de l'étude des conditions générales de l'écoulement fluvial dans le bassin versant de l'oued Inaouène, on a permis d'en ressortir plusieurs paramètres dont chacun joue un rôle pouvant soit favoriser ou bien entraver l'écoulement et le perturber.

D'abord en ce qui concerne la morphométrie du bassin, les indices confirment qu'il se distingue par une forme allongée. Celle-ci favorise un temps de concentration des eaux élevé, donc les eaux de pluies prendront beaucoup de temps pour arriver à l'exutoire.

Ensuite, il y a le complexe physique du bassin qui influence, dans une large part, sur le comportement hydrologique. Le relief du bassin est généralement diversifié, accidenté, et favorise la rapidité du transfert de l'écoulement vue la dominance des pentes fortes surtout dans l'amont du bassin, zone de naissance des affluents. En ce qui concerne la géologie, le bassin est distingué par une lithologie et structure diversifiée. La lithologie varie selon le domaine structural, mais les formations imperméables restent les plus dominantes, par conséquent les crues seraient rapides et brèves. Pourtant, l'existence des roches perméables favorise la reconstitution des nappes qui soutiendront l'écoulement en période sèche.

Concernant le contexte climatique, le bassin appartient au climat méditerranéen vu sa situation géographique et connaît une grande variabilité tant sur l'échelle temporelle que spatiale. En conséquence, le régime hydrologique sera fortement influencé par le régime climatique parce que celui-ci est le générateur des débits ; Le couvert végétal est généralement dégradé sauf dans le Moyen-atlas où l'on trouve des forêts, donc leurs effets sur le plan hydrologique (infiltration, interception) seront relativement exclus. Le réseau hydrographique est très dense corroborant la dominance d'un substrat imperméable qui favorise les écoulements superficiels.

Finalement, il y a le facteur anthropique qui influe sur les ressources en eau du bassin et perturbe l'écoulement. Le bassin d'Inaouène est dominé par plusieurs concentrations humaines qui ont pour effet la réduction des volumes d'eau générés par le bassin comme l'exploitation des nappes (puits) et le prélèvement des eaux fluviales pour l'irrigation. L'autre effet se concrétise dans les barrages artificiels qui perturbent le comportement hydrologique naturel. En outre, il y a les effluents d'eau utilisée issues des zones urbaines qui corrompent les valeurs réelles des débits surtout en période d'étiages.

Deuxième partie

Bilan hydrologique du bassin versant et caractérisation du régime hydrologique de l'oued Inaouène

Introduction de la Deuxième Partie

Chapitre 3

Bilan hydrologique du bassin versant d'Inaouène

Chapitre 4

**Caractérisation du fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène et variations
naturelles des débits**

Conclusion de la Deuxième Partie

Introduction de la Deuxième Partie

Les débits dans un bassin versant sont générés essentiellement par les précipitations reçues. Celles-ci vont pour partie à l'infiltration, afin de constituer les réserves hydriques du sol et du sous-sol. Une partie va à l'évapotranspiration en détruisant les eaux par l'effet de la température, et pour autre partie au ruissellement, et donc à l'écoulement du cours d'eau ; il s'agit alors d'un système où les entrées et les sorties ne peuvent qu'à approximativement être évaluées. Après tous ces processus, les eaux précipitées arrivent à l'exutoire sous forme d'écoulement fluvial dont le régime et la variation dépendent des facteurs physiques du bassin versant et de la variation temporelle de la lame d'eau précipitée.

Cette partie du PFE sera consacrée à l'étude du bilan hydrologique du bassin d'Iaouène et la caractérisation de son fonctionnement hydrologique :

Dans le premier chapitre, on estimera les différents termes du bilan hydrologique du bassin afin de définir la saisonnalité hydrologique du bassin. Cette démarche s'inscrit dans une perspective permettant d'avoir des idées sur la saison d'indigence hydrologique où les réserves du bassin sont en plein épuisement, ce qui permet aux aménageurs de pré déterminer et prévenir les risques de sécheresse et les conséquences socio-économiques qui y sont liées.

Le seconde chapitre sera consacré à la caractérisation du fonctionnement hydrologique de l'oued Iaouène. Ceci est possible grâce à l'analyse de la variabilité naturelle des débits sur les différentes échelles temporelles (journalière, mensuelle et annuelle) mais aussi la caractérisation de l'évolution longitudinale des débits de l'amont vers l'aval par l'analyse des données hydrologiques de deux stations de mesures (Bab Marzouka et El Kouchat). Les résultats de ce chapitre seront ensuite exploités pour l'analyse des situations extrêmes de l'écoulement dans la troisième partie.

Chapitre 3

Bilan hydrologique du bassin versant d’Inaouène

Sommaire

Introduction

1- Paramètres de base du bilan hydrologique

1-1- Lames d'eau précipitées

1-2- Lame d'eau écoulée

1-3- Evapotranspiration

1-4- Réserves en eau du bassin

2- Etablissement du bilan hydrologique

2-1- Bilan mensuel

2-2- Bilan annuel

Conclusion du chapitre

Introduction

Dans une perspective des entrées et sorties, le bilan hydrologique d'un bassin versant n'est qu'un bilan d'un cycle d'eau basculant entre des entrées sous forme de précipitations et des sorties d'eau qui s'évaporent ou s'écoulent à l'exutoire, et durant ce processus les composantes physiographiques du bassin (substrat géologique, sols, couvert végétal,) jouent un rôle déterminant.

Le bilan hydrologique global, habituellement présenté dans les manuels d'hydrologie, est celui qui résulte de la différence des débits des précipitations. Celui-ci s'inscrit sous la forme :

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{D}, \text{ ou mieux } \mathbf{P} - \mathbf{Q} = \mathbf{D}$$

(*P* étant la lame d'eau précipitée, *Q* est la lame d'eau éoulée, et *D* est le déficit d'écoulement, tout est exprimé en mm).

Cette démarche, quelque peu simplifiée (W. WUNDT, 1937, et A. COUTAGNE, 1942, R. LAMBERT, 1975) présente un inconvénient dans l'évaluation du bilan de l'eau, puisqu'elle n'intègre que les trois variables : précipitations, évaporation et débits.

Etant donné que la destinée de l'eau des précipitations soit triple : une partie pour l'écoulement, une partie pour l'infiltration et l'autre partie se soustrait par l'évapotranspiration, l'équation du bilan hydrologique s'écrit alors sous la forme suivante :

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{ET} + \Delta\mathbf{R}$$

P : étant les précipitations (mm), *Q* : Lame d'eau éoulée (mm), *ET* : évapotranspiration, $\Delta\mathbf{R}$: la variation des réserves.

Le bilan hydrologique du bassin d'Inaouène va être calculé de l'amont à l'aval en se basant sur les trois stations hydrologiques (El Kouchat, Bab Marzouka, Bab Chhoub) et il sera estimé à l'échelle mensuelle et à l'échelle annuelle.

1- Les paramètres de base du bilan hydrologique

Le bilan hydrique est simple dans son principe. Il s'agit de résoudre l'expression :

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q} + \mathbf{ET} + \Delta\mathbf{R}$$

Où P = les précipitations,

Q = l'eau éoulée par les rivières

ET = l'évapotranspiration

$\Delta\mathbf{R}$ = les réserves en eau dans le bassin

Toutes ces valeurs seront exprimées en lame d'eau, c'est-à-dire en mm.

1-1- Lame d'eau précipitée (P)

Elle représente la hauteur moyenne des précipitations incidentes sur le bassin versant. Les précipitations dans le bassin d'Inaouène présentent des variations tant à l'échelle temporelle que spatiale. Elles sont abondantes en période humide surtout en hiver et début de printemps et bien entendue en zones montagneuses élevées.

La lame d'eau précipitée sur le bassin versant doit être mesurée avec soin. Certains auteurs se contentent parfois de la moyenne des précipitations de quelques stations dites « représentatives ». En toute rigueur, il faut tracer une carte précise d'isohyètes, à partir d'un réseau dense et bien contrôlé. Dans le cadre de cette étude on va, pour chaque superficie contrôlée par une station hydrologique, calculer la lame d'eau précipitée en se basant sur la méthode des isohyètes. Une fois les courbes isohyètes sont tracées, la pluie moyenne précipitée peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K A_i \cdot P_i}{A}$$

Où

P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,
 A : surface totale du bassin
 A_i : surface entre deux isohyètes i et $i+1$,
 K : nombre total d'isohyètes,
 P_i : moyenne des hauteurs h de précipitations entre deux isohyètes i et $i+1$.

Pourtant, vue l'indisponibilité des données pluviométriques mensuelles pour toutes les stations abordant le bassin on va aussi se contenter de stations représentatives pour évaluer la lame d'eau précipitée à l'échelle mensuelle.

1-2- Ecoulement (Q)

Cette lame concerne la fraction d'eau éoulée dans le bassin par plusieurs voies : 1) le ruissellement direct de surface, 2) l'écoulement hypodermique issu du sol et des altérites, 3) l'écoulement souterrain provenant soit de circulations profondes, soit des nappes aquifères et revenant en surface par le biais de sources et émergences. Quelle que soit la forme d'écoulement généré dans le bassin, il finit à drainer vers le collecteur principal de l'eau dans le bassin : oued Inaouène.

Rappelons très vite comment on obtient les lames éoulées quand on dispose juste des débits bruts :

Tableau 17 – Méthode de calcul de la lame d'eau écoulée d'un cours d'eau

Formule 1	Formule 2	Paramètres
$Q = \frac{\bar{q} \times t}{A \times 1000}$	$Q = \bar{q} \times t \times 10^{-6}$	<p>Q : la lame d'eau écoulée en (mm), \bar{Q} : débit moyen annuel ou mensuel (m^3/s), \bar{q} : débit spécifique moyen annuel ou mensuel ($l/s/km^2$) ; $\bar{q} = (\bar{Q} \times 1000) / A$ t : nombre de secondes en an (31536000) ou en mois, A : superficie du bassin contrôlée (km^2).</p>

1-3- Evapotranspiration

C'est la lame d'eau évaporée par les étendues liquides ou le sol humide et transpirée par les plantes. On l'appelle donc évapotranspiration. Mais il faut distinguer l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). L'ETP, que beaucoup d'auteurs appellent EP pour des commodités d'écriture, est la lame liquide évaporée et transpirée lorsque la fourniture d'eau au substratum terrestre est illimitée. En revanche, l'ETR est la quantité d'eau évapotranspirée par le sol et les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique. Par exemple sur un océan, un lac, une prairie inondée, ETR=ETP. Mais pendant l'été, si le sol est partiellement sec et s'il ne pleut pas, les plantes ne peuvent transpirer que la quantité d'eau dont elles disposent, c'est-à-dire une quantité inférieure à ETP.

Il est donc clair que ETP, et non ETR, représente les besoins en eau de la végétation. En conséquence, c'est bien ETP qu'il faut introduire dans les bilans, pour connaître les conditions réelles d'abondance ou de d'indigence en eau.

Pour calculer la lame d'eau évapotranspirée (potentiellement) on va se baser sur des formules empiriques comme celles de Turc ou de Thornthwaite, communément utilisées dans les travaux d'hydrologie et d'agronomie.

1-3-1- Formule de Thornthwaite

Thornthwaite a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration potentielle mensuelle. Cet auteur définit d'abord un indice mensuel i .

$$i = (T / 5)^{1,514}$$

T est la température moyenne du mois considéré, exprimée en °C.

I est la somme des indices mensuels de l'année

$$(I = \sum i)$$

La formule de l'ETP devient :

$$ETP = 16 (10.T / I)^a \cdot K$$

ETP : évapotranspiration potentielle en mm.

T : température moyenne du mois considéré, exprimée en °c.

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49.$$

Remarque : Si $10 \leq I \leq 80$ alors :

$$a = (1,6 / 100) I + 0,5$$

K : coefficient de correction lié à la latitude (durée max de l'ensoleillement).

L'indice K est facteur de correction, donné par la table de Brocher et Gerbier (tabl. 2), par lequel il convient de multiplier, selon le mois et la latitude, les valeurs de l'ETP non corrigées pour obtenir l'évapotranspiration potentielle.

Tableau 18- Facteur de correction K.

Latitude nord	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
20°	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25°	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26°	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27°	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.90	0.90
28°	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.90	0.90
29°	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89
30°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31°	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32°	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33°	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34°	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35°	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36°	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37°	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38°	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39°	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81

1-3-2- Formule de Turc

L'agronome français L. Turc a pu développer deux formules pour estimer l'évapotranspiration : une pour estimer l'ETP et se calcule à l'échelle d'un mois, et la deuxième formule pour estimer l'ETR mais cette fois-ci à l'échelle annuelle.

A- Formule de l'ETP de Turc

L. Turc a cherché de développer une expression empirique pour estimer l'ETP, ajustée expérimentalement sur deux seules données : température et insolation.

$$\text{ETP Turk} = 0,4 \frac{t}{t+15} (\text{Ig}+50)$$

ETP : évapotranspiration potentielle exprimée en mm/mois.

t : température moyenne du mois considéré, en °c.

Ig : radiation globale en cal/cm²/jour (valeur quotidienne moyenne du mois).

L'indice Ig s'obtient en fonction de la durée d'insolation b, d'après :

$$\text{Ig} = \text{Ig}^A (0,18 + 0,62 \frac{h}{H})$$

Où Ig^A = radiation globale quotidienne moyenne, si l'atmosphère n'existe pas (valeur dépendant de la latitude et qui est fournie par des tables)

h= durée quotidienne moyenne de l'insolation pendant le mois considéré.

H= durée astronomique du jour en l'absence de nuages (valeur mensuelle moyenne exprimée en heures par jour, déterminée uniquement par la latitude et fournie par des tables).

Tableau 19 – Les valeurs de Ig^A et H et h pour le bassin d'Inaouène selon sa situation géographique

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
IgA (cal/cm²/j)	436	559	718	856	947	978	956	874	749	597	459	396
H (h/j)	10,08	10,86	11,98	13,08	14,05	14,51	14,26	13,46	12,41	11,3	10,33	9,81
h (h/j)	9,6	10,4	10,8	10,7	11,3	11,6	11,4	11,4	11,3	10,4	10,3	9,6

La formule de Turc pour l'estimation de l'ETP ne réclame donc que deux données (t et h) et les calculs sont possibles avec deux tables seulement (Ig^A et H).

B- Formule de l'ETR de Turc

Turc propose aussi une formule permettant d'évaluer la moyenne annuelle d'ETR. Il s'agit en fait du calcul d'un déficit d'écoulement qui n'est identifiable à l'ETR à condition qu'il n'y ait pas d'échanges souterrains à la frontière du bassin versant et que les variations de la réserve en eau souterraine soient négligeables. L'ETR moyenne annuelle est estimée comme suit :

$$\text{ETR Turk} = \frac{P}{\sqrt{(0,9 + \frac{P^2}{L^2})}}$$

Avec ETR : évapotranspiration réelle en mm/an

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

T : Température moyenne annuelle en °c

P : Précipitation moyenne annuelle

1-4- La variation des réserves (ΔR)

Chaque bassin versant se caractérise par sa capacité de rétention d'eau qui représente le total des volumes d'eau qu'il peut éventuellement emmagasiner durant un certain temps. Ces volumes d'eau constituent alors les réserves du bassin. Ils ne sont pas injectés directement dans le réseau hydrographique pour être mis en mouvement et transférés vers l'exutoire. Mais ils sont ralentis ou stockés, au moins provisoirement dans des dépressions (lacs...) dans les nappes souterraines, dans les chenaux du réseau hydrographique lui-même, sous forme d'humidité dans le sol ou dans les réserves glaciaires et nivales.

Dans l'équation du bilan, la variation des réserves (ΔR) est une grandeur très déterminante. C'est elle qui permet la régulation du fonctionnement hydrologique du cours d'eau : elle représente la différence entre les réserves provenant d'une période antérieure et celles accumulées à la fin de la période considérée. Pour un bassin donné, la réserve dépend globalement des années : elle augmente durant les années humides et diminue pendant les années sèches (ΔR prend alors une valeur négative, puisque le bassin perd de l'eau). Ces remarques s'appliquent également aux échelles saisonnières : la quantité des réserves peut s'accroître en saisons pluvieuses, comme elle peut diminuer en saisons sèches.

Ainsi, schématiquement, pour une période déterminée, la relation liant les gains, les pertes et le stockage dans un bassin versant est exprimée par la formulation suivante :

$$\Delta R = P - (Q + ET)$$

(ΔR) est donc une variable permettant d'évaluer sommairement le budget hydrologique d'un bassin versant. C'est la différence existante entre la quantité d'eau qui entre dans le système (entrées) et la quantité d'eau qui le quitte (sorties).

2- Etablissement du bilan hydrologique

Dans l'établissement du bilan hydrologique du bassin versant il est nécessaire de calculer et d'estimer les différents paramètres qui le constituent. Ensuite, on passe à évaluer le déficit d'écoulement (D) car il est très utile pour appréhender le fonctionnement hydrologique des bassins versants. Le déficit d'écoulement est défini comme étant la différence entre les précipitations tombées (P) sur le bassin et la lame d'eau écoulée (Q) à une station de mesure considérée. Ce paramètre hydroclimatique est exprimé en hauteur de lame d'eau, il est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{D = P - Q}$$

2-1- Bilan mensuel

L'analyse du bilan hydrologique du bassin d'Inaouène concerne ses trois sections mesurées en utilisant les débits de trois stations hydrologiques : El Kouchat, Bab Marzouka, Bab Chhoub. En contrepartie, face à l'indisponibilité des données pluviométriques mensuelles de toutes les stations climatiques abordant le bassin et devant l'absence des données thermiques on va se contenter des données de la station climatique de Taza, considérée comme station représentative de tout le bassin, afin d'évaluer les lames d'eau précipités à l'échelle mensuelle et d'estimer l'évapotranspiration dans le bassin.

Il est admis chez les hydrologues que l'année hydrologique se subdivise en deux périodes. Ceci est juste si l'on se basant deux paramètres : précipitations (P) et évapotranspiration (ETP). La première c'est l'hiver hydrologique qui commence dès que $P > EP$; la deuxième période c'est l'été hydrologique qui commence dès le moment où $ETP > P$. L'adoption de ce principe conduit à constater que l'été hydrologique au bassin d'Inaouène, en utilisant l'ETP de Turc, est très longs (10 mois) et débute de février à novembre. Puisque $EP > P$ pendant l'été, les plantes utilisent la totalité des précipitations, et l'écoulement doit être assuré pendant toute l'année par les précipitations de l'hiver (loi de Dausse), en l'occurrence décembre et janvier. Cependant, il s'avère que la formule de Turc de l'ETP donne des valeurs exponentielles parce que tous les indices climatiques confirment que la période sèche dans le bassin d'Inaouène couvre juste les mois de mai, juin, juillet, aout, septembre. C'est pourquoi il s'avère que la formule de Thornthwaite donne d'excellentes approximations d'ETP en vue des conditions du bassin. Selon sa formule l'hiver hydrologique se coïncide parfaitement à la période humide dans le bassin, et il débute de novembre à avril, alors que l'été hydrologique est très court par rapport à celui déduit de la formule de Turc.

En faisant la différence entre le déficit d'écoulement (D) et l'évapotranspiration (ETP) on obtient alors la quantité d'eau qui va s'infiltrer (R). Une partie de l'infiltration rejoint sans doute les nappes profondes, ceci est difficile à mesurer ; le reste constitue la réserve utile (RU). En additionnant le résultat de toutes les différences pour tous les mois de l'année durant lesquels le déficit d'écoulement D est supérieur à l'évapotranspiration ETP, on obtient l'eau stockée. Ce stock en eau est de l'ordre de 209 mm/m² au niveau de la station d'El Kouchet, et 197 mm/m² à Bab Marzouka.

Tableau 20 – Bilan hydrologique du bassin d'Inaouène à El Kouchet

[Durée d'observation 1971- 2013]

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
P	84	80	74	66	35	8	1	2	17	49	81	92
Q	14	24	15	10	8	2	0,7	0,3	0,8	3	5	9
ETP Turc	64	86	112	130	156	174	181	174	150	113	82	62
ETP Thornthwaite	19	24	40	51	87	130	183	175	115	72	35	21
D	70	56	59	56	28	6	0	1	17	46	76	83
R	50	32	20	4	-59	-124	-183	-173	-98	-26	41	62
<i>Période de remplissage des stocks en eau (RSE)</i>				<i>Période de vidange des nappes</i>				<i>RSE</i>				

Tableau 21 – Bilan hydrologique du bassin d'Inaouène à Bab Marzouka

[Durée d'observation 1976- 2002]

	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
P	84	80	74	66	35	8	1	2	17	49	81	92
Q	18	20	21	14	6	1,5	0,4	0,2	1,3	3	4	12
ETP Turc	64	86	112	130	156	174	181	174	150	113	82	62
ETP Thornthwaite	19	24	40	51	87	130	183	175	115	72	35	21
D	66	60	53	52	29	6,7	0,4	1,3	16	46	77	80
R	46	36	13	1	-57	-123	-183	-173	-99	-27	42	59
<i>Période de remplissage des stocks en eau</i>				<i>Période de vidange des nappes</i>				<i>RSE</i>				

A l'échelle mensuelle, un certain nombre de constatations qu'on peut émettre sur le bilan hydrologique du bassin d'Inaouène :

-La variabilité spatiale du bilan hydrologique dans le bassin d'Inaouène concerne seulement l'écoulement Q, le déficit pluviométrique D et les réserves en eau du bassin R et elle ne s'observe pas sur l'ETP et les précipitations P puisqu'on a utilisé les mêmes données pour toutes les sections (station de Taza),

- La supériorité de lame d'eau écoulée en amont et sa diminution en aval puisque la plupart des affluents naissent en montagnes et traversent dans leur bassin inférieur des zones moins arrosées alors que l'aire de drainage s'agrandit proportionnellement plus vite que ne s'accroissent les débits,

-Les bilans confirment le rôle des facteurs thermiques dans le transfert de l'eau, puisque l'évapotranspiration agit sur les débits estivaux,

-L'augmentation progressive de l'ETP entraîne successivement un abaissement de l'excédent en eau D,

-Les réserves hydriques du bassin R calculées à base de l'ETP de Thornthwaite, varient selon les caractéristiques hydroclimatiques du bassin.

-Le déficit d'écoulement se répercute sur les stocks en eau du bassin. Deux périodes distinctes : phase de remplissage des réserves se prolongeant sur les mois de novembre à avril ; et période de ressuyage des sols et vidange des nappes allant de mars à octobre,

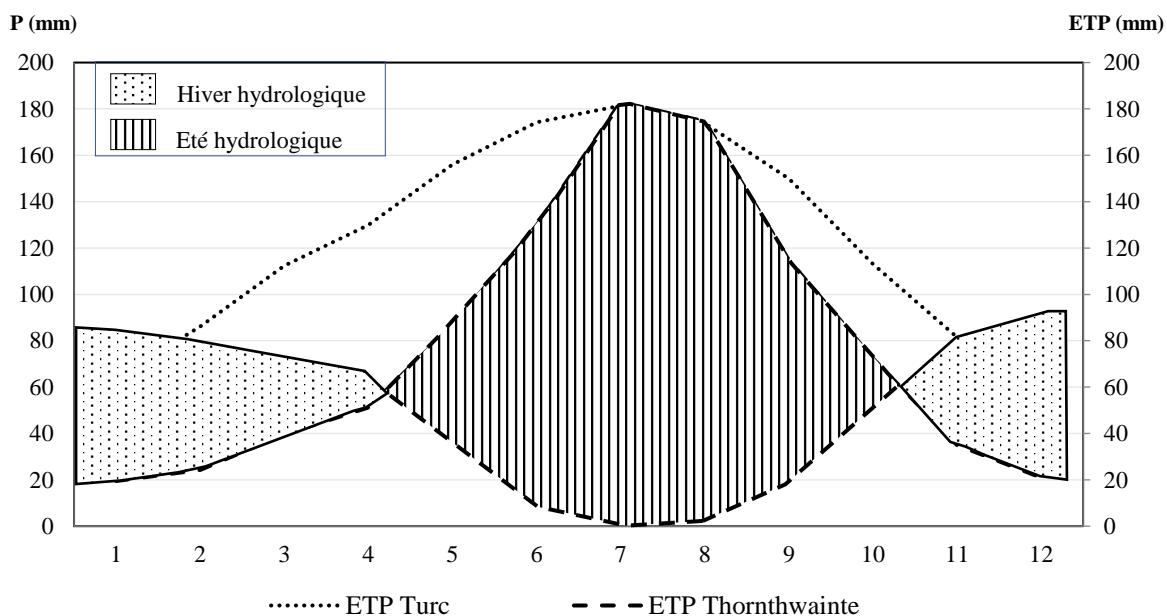


Figure 19 – Périodes d'été et hiver hydrologiques dans le bassin d'Inaouène

2-2- Bilan annuel

Avant de procéder à l'établissement du bilan hydrologique annuel du bassin d'Inaouène il faut noter qu'à l'inverse de ce qu'on a fait dans le bilan mensuel, les données pluviométriques seront individuellement évaluées pour chaque section du bassin d'Inaouène. Ceci est grâce aux données annuelles d'un réseau composé de 33 stations climatiques à la fois entourant et situé dans le bassin. D'ailleurs, la lame d'eau évapotranspirée sera évaluée en utilisant les seules données de la station de Taza.

A l'instar du bilan mensuel, les paramètres du bilan annuel connaissent aussi de différences spatiales entre les différentes superficies contrôlées du bassin. Concernant la lame d'eau précipitée on observe qu'elle est presque pareille dans toutes les sections contrôlées du bassin d'Inaouène, sauf au niveau du bassin de Lahder où l'on voit une légère augmentation des précipitations. Là, on peut en déduire que la moyenne interannuelle des précipitations de la station climatique de Taza (590 mm) correspond quasiment au mieux à la moyenne de la lame d'eau précipitée sur toutes les sections du bassin d'Inaouène.

Tableau 22 – Lames d'eau précipitée dans les différentes sections du bassin d'Inaouène

L'exutoire	Superficie contrôlée (km ²)	Lame d'eau précipitée (mm)
Station Bab Chhoub	606	657
Station Bab Marzouka	1510	602
Station El Kouchat	2647	604

En ce qui concerne la lame d'eau écoulée, on constate qu'elle varie bien entre les sections du bassin d'Inaouène. En effet, on observe d'importantes variations de l'amont vers l'aval. Par exemple, la lame d'eau écoulée au niveau de la station d'El Kouchat, considérée comme station d'aval, est faible (92,8 mm) par rapport aux valeurs écoulées en amont, 102,6 mm à Bab Marzouka et 127,2mm à Bab Chhoub. Plus qu'on part vers l'aval plus la superficie augmente et plus la lame d'eau écoulée diminue puisque la plupart des affluents naissent à l'amont (zone d'alimentation) et traversent dans leur bassin inférieur des zones moins arrosées alors que l'aire de drainage s'agrandit proportionnellement plus vite que ne s'accroissent les débits.

Tableau 23 – Lame d'eau écoulée dans les stations du bassin d'Inaouène

Stations	Superficie contrôlée (km ²)	Q (mm)	\bar{Q} (m ³ /s)	\bar{q} (l/s/km ²)*
Station Bab Chhoub	606	127,2	2,44	4,03
Station Bab Marzouka	1510	102,6	4,9	3,3
Station El Kouchat	2647	92,8	7,79	2,9

Q : lame d'eau écoulée , \bar{Q} : débit moyen annuel, \bar{q} : débit spécifique moyen annuel

Station Bab Chhoub : [Durée d'observation 1987- 2011]

Station Bab Marzouka : [Durée d'observation 1971- 2013]

Station El Kouchat : [Durée d'observation 1976- 2002]

Les constations qu'on peut souligner sur le bilan hydrologique annuel de l'oued Inaouène sont les suivantes :

- Les différents paramètres hydroclimatiques du bilan hydrologique varient grandement entre les sections du bassin d'Inaouène.
- La pluviométrie incidente sur le bassin se répartit de façon inégale entre les différents processus qui la suivent. La majorité des précipitations vont pour grande quantité à l'évapotranspiration.
- Le bassin d'Inaouène connaît un grand stress hydrique puisque la moyenne annuelle du stock en eau est négative, c.-à-d. que le bassin à l'échelle annuelle perd toujours l'eau qu'il contient à travers le ressuyage des sols et le vidange des nappes. Heureusement, il y a recharge des nappes qui a lieu pendant les années humides sinon le bassin va rentrer dans un stress permanent et va voir toutes ses réserves épuisées.
- Le déficit d'écoulement au niveau de la station de Bab Chhoub est le plus élevé parmi les autres puisque l'eau précipitée s'infiltra autant plus pour atténuer le stress au niveau des réserves du bassin. La preuve c'est que la négativité des valeurs de R est la plus basse dans le bassin.

Tableau 24 - Bilan hydrologique annuel dans les différentes sections du bassin d’Inaouène

	P	Q	ETR de Turc	R	D
Station Bab Marzouka	602	102,6		-39	499
Station El Kouchat	604	92,8	538	-27	511

ETR : évapotranspiration réelle, R : réserves en eau dans le bassin, D : déficit d’écoulement

Conclusion du chapitre

En guise de conclusion, le bilan hydrologique de l’oued Inaouène connaît des périodes de stress hydrique dues à une réduction des précipitations accompagnées de pertes en eau favorisées par l’évaporation et le vidange des nappes souterraines, et de périodes d’abondance hydrique lorsque les précipitations reçues dépassent les quantités d’eau évaporées. Chacune d’entre elles influence sur le fonctionnement hydrique de l’oued pendant l’année et à l’échelle pluriannuelle.

A l’échelle mensuelle, on a constaté une variabilité des termes du bilan entre la partie amont du bassin d’Inaouène et celle d’aval et leur variation entre les mois de l’année. De mai jusqu’à octobre, cette période est considérée comme une période d’abondance hydrologique où les pertes en eau sont inférieures aux apports en eau. En revanche, les autres mois sont qualifiés comme une saison d’épuisement des réserves en eau du bassin où l’évapotranspiration est supérieure aux entrées pluviométriques.

A l’instar du bilan mensuel, le bilan hydrologique annuel connaît également des différences entre le secteur d’Inaouène à Bab Marzouka et le secteur limité à El Kouchat. La pluviométrie baisse progressivement en avançant vers l’aval. Les débits bruts écoulés à l’aval sont plus grands mais les lames d’eau écoulées en amont sont supérieures à celles estimées à El Kouchat. En gros, le bilan hydrologique annuel du bassin d’Inaouène est largement déséquilibré de simple raison que les réserves souterraines soient en épuisement accentué.

Chapitre 4

Caractérisation du fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène et variations naturelles des débits

Sommaire

Introduction

1- Débits moyens journaliers

- 2-1- Courbe des débits moyens journaliers
- 2-2- Courbe des débits cumulatifs
- 2-3- Courbe des débits classés
- 2-4- Débits caractéristiques
- 2-5- Débits journaliers : étude des situations hydrologiques particulières

3- Débits mensuels : variation et régime

- 3-1- Régime mensuel des débits
- 3-2- Coefficient mensuel des débits
- 3-3- Variation interannuelle des débits mensuels

4- Débits annuels

- 4-1- Variations des modules annuels
- 4-2- Méthode des écarts à la moyenne
- 4-3- Coefficient d'hydraulité
- 4-4- Relation entre les précipitations et débits annuels

Conclusion du chapitre

Introduction

Ce chapitre a pour objectif la caractérisation du fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène en se basant notamment sur l'étude des variations spatiales temporelles de ses débits. En effet, ceux-ci sont par essence variables avec le temps à toutes les échelles (journalières, mensuelles, annuelles et pluriannuelles), puisqu'ils constituent une réponse quantifiée du bassin versant aux évènements météorologiques qui sont à leur tour caractérisés par une forte variabilité spatio-temporelle. Lors de cette variabilité, le cours d'eau peut être en état de hautes eaux, en crues, en état de basses eaux, état d'étiage.

La connaissance de toutes ces situations à partir d'une série de relevés hydrométriques s'avère capitale en hydrologie fluviale pour mieux caractériser le fonctionnement hydrologique d'un cours d'eau. Leur distinction et qualification de ces fluctuations hydrologiques seront basé sur des méthodes à la fois statistiques et graphiques, surtout l'utilisation des coefficients hydrologiques de variabilité qui permettent de quantifier le rythme de variations et distinguer les moments d'écartement où les débits se déclinent de leur moyenne à partir d'une distribution statistique plus ou moins homogène.

1- Débits moyens journaliers

Rappelons que les débits moyens journaliers (m^3/s) représentent la moyenne arithmétique des débits instantanés journaliers. L'analyse des débits journaliers de l'Oued Inaouène permet de caractériser le rythme de croissance et de décroissance des débits durant les jours de l'année. Pour ce fait, on va utiliser trois éléments couramment adoptés dans les manuels d'hydrologie : courbe des débits moyens journaliers, débits classés et débits cumulatifs.

1-2- Courbe des débits moyens journaliers

Sur cette courbe on trace les débits moyens journaliers d'une année dite "année moyenne" de toute la série d'observation. Elle présente un intérêt particulier dans la mesure où l'on veut analyser les fluctuations des débits journaliers de l'oued le long de l'année.

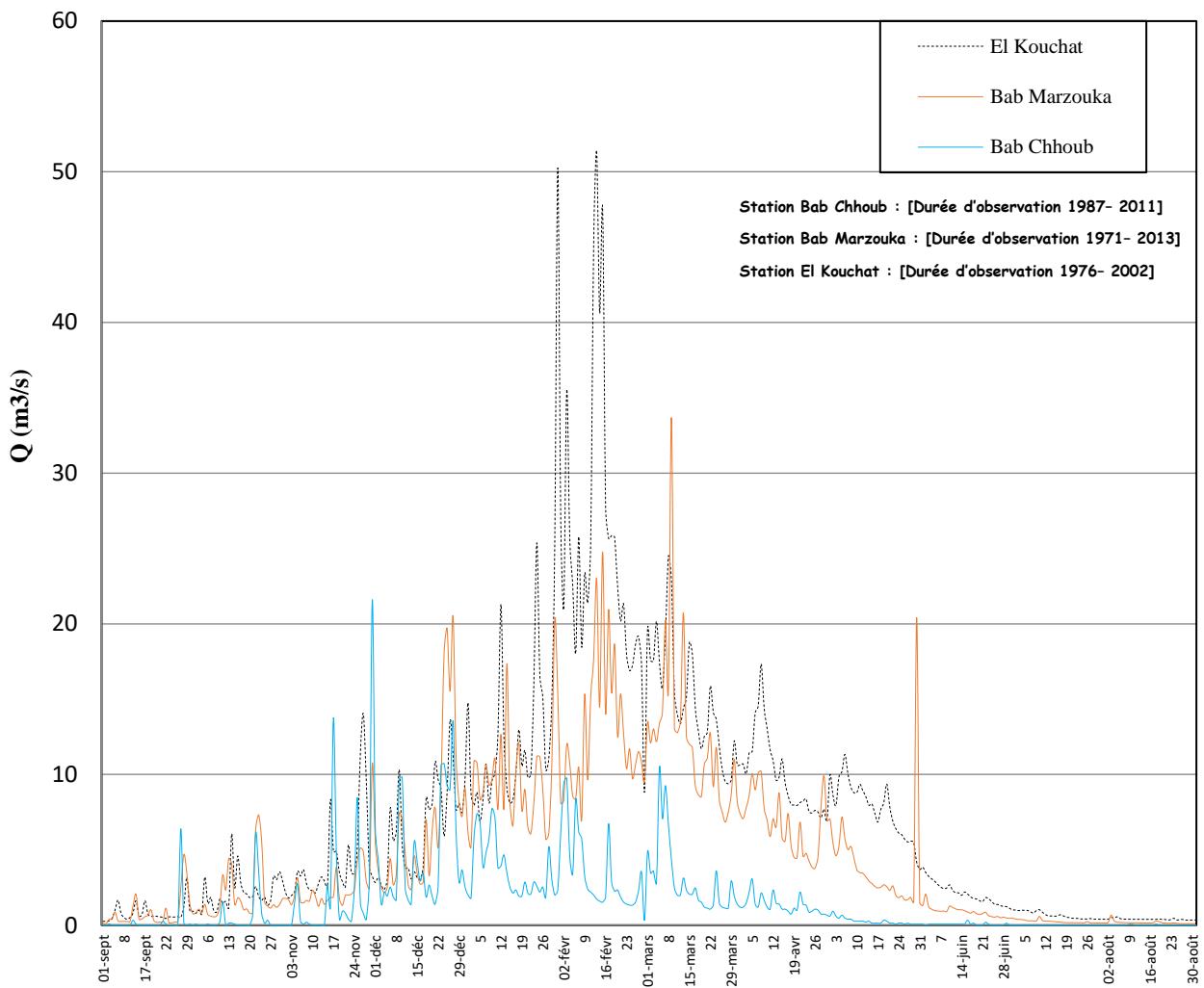


Figure 20 – Courbes de débits moyens journaliers dans le bassin d’Inaouène

Les débits moyens journaliers (Qmj) montrent de grandes fluctuations le long de l’année. Généralement, on observe que les Qmj enregistrés à l’aval du bassin et précisément à El Kouchet sont plus élevés par rapport aux autres stations de l’amont. Cette supériorité est claire en hiver et printemps. En revanche, en période automnale on observe pas mal de pics journaliers à la section supérieure du bassin (Bab Chhoub) qui saillissent sur les autres. Ceci est dû à l’abondance des faciès imperméables au niveau de cette section.

1-2- Courbe des débits cumulatifs

Les débits journaliers cumulatifs présentent un grand avantage dans l’analyse de la variation journalière des volumes d’eau écoulés. Ils permettent de détecter les irrégularités et le mode de l’évolution temporelle des débits journaliers au cours d’une année.

On obtient les débits cumulatifs en ajoutant la valeur de chaque débit à la somme des autres valeurs. C.-à-d. On ajoute la valeur de débit du premier jour à celle du deuxième jour, et puis la somme de ces deux valeurs à celle du troisième jour et ainsi de suite ($EC = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_k$).

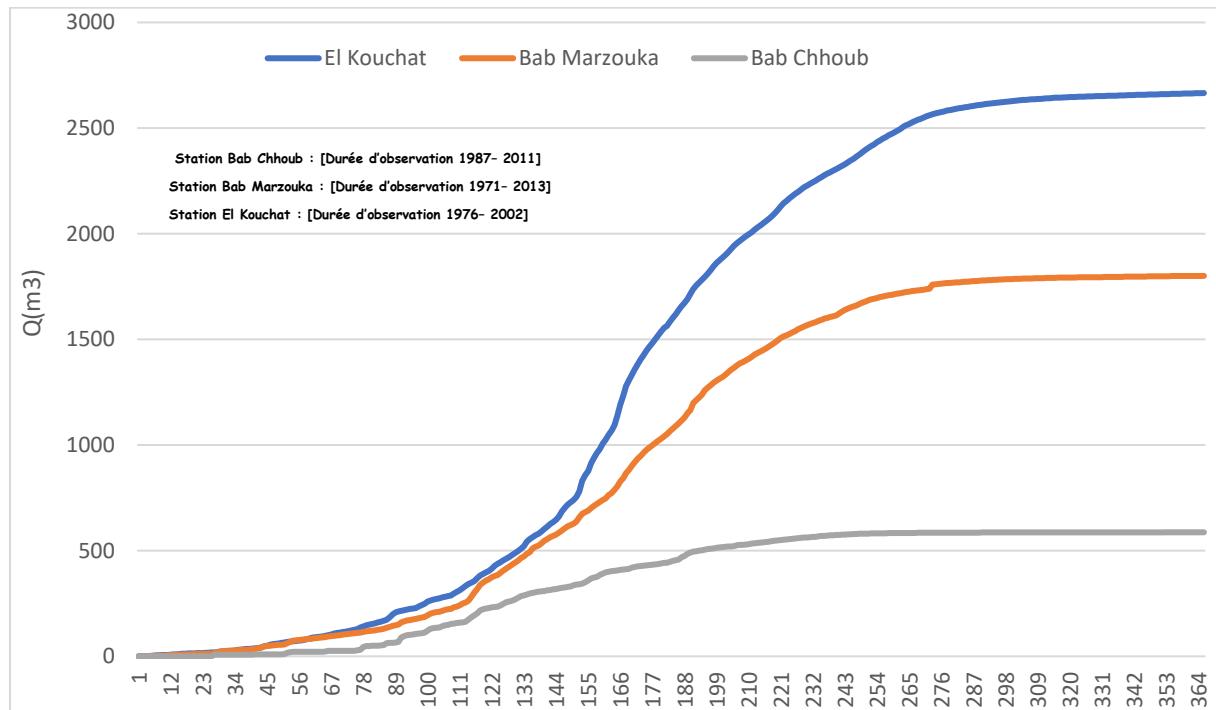


Figure 21 – débits cumulatifs de l’oued Inaouène dans les différentes sections mesurées

La courbe des débits cumulatifs pour les trois stations de l’oued Inaouène montre que l’évolution journalière des débits est tout à fait hétérogène puisque la courbe n’est rectiligne et présente des ruptures et des cassures dans sa pente. La rupture la plus importante est celle qui sépare les débits automnaux et les débits hivernaux puisqu’en hiver les conditions climatiques deviennent très humides avec beaucoup de précipitations, ce qui provoque une augmentation exponentielle des débits additionnés. La deuxième discontinuité s’observe entre les débits printaniers et les débits de la saison sèche.

1-3- Courbe des débits classés

Les débits classés d’un cours d’eau sont obtenus en faisant un classement de ses débits journaliers relatifs à une longue série d’années. Le premier traitement consiste à classer les 365 valeurs quotidiennes de chaque année par ordre décroissant indépendamment de leur ordre chronologique. Une fois les débits sont classés, ils peuvent être représentés ensuite sur un graphique donnant en ordonnée la valeur du débit journalier et en abscisse le nombre de jours.

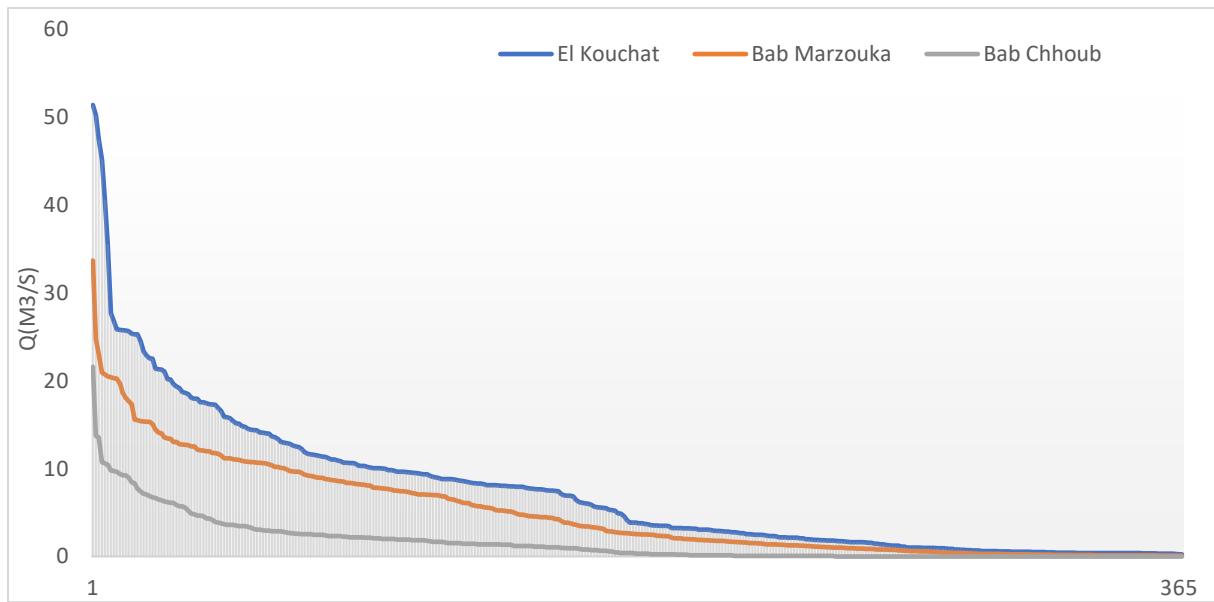


Figure 22 – Débits journaliers classés de l’Oued Inaouène

Station Bab Chhoub : [Durée d’observation 1987- 2011]

Station Bab Marzouka : [Durée d’observation 1971- 2013]

Station El Kouchat : [Durée d’observation 1976- 2002]

Bien que les débits s'accroissent en station d'aval qu'en amont, le fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène est presque pareil dans toutes les sections, puisque lorsque l'on observe de ses débits classés on aperçoit une descendante rapide de la courbe pour toutes les stations de mesure du fait de l'existence d'un nombre réduit de jours de forts débits, et qui sont importants en station d'El Kouchat. L'observation montre aussi que la période de basses eaux et de très basses eaux est plus longue au niveau de l'oued Inaouène.

1-4- Débits caractéristiques

Les débits caractéristiques sont de précieux repères hydrologiques. Ils sont relevés à partir des débits journaliers classés et se présentent sous un angle fréquentiel. Ces débits donnent de bonnes renseignements sur le régime des cours d'eau parce qu'ils déterminent des seuils et valeurs pour les différentes situations du cours d'eau (basses ou hautes eaux, étiages.....).

En morphodynamique fluvial, la détermination des débits caractéristiques est très intéressante car elle permet de savoir à quel niveau fréquentiel se place un événement hydrologique.

Tableau 25 – Débits caractéristiques de l’oued Inaouène

Signe	Signification	DC de l’oued Inaouène (m ³ /s)		
		St. El Kouchat	St. Bab Marzouka	St. Bab Chhoub
DC _i (DC ₁)	débit de crue inondante	51,4	33,7	21,6
DC _M	débit caractéristique maximal ou débit dépassé 10 jours/an	25,8	19,7	9,4
DC ₁	débit dépassé 1 mois/an	19,2	12,8	5,7
DC ₃	débit dépassé 3 mois/an	10,3	8,2	2,2
DC ₆	débit caractéristique médian ou débit dépassé 6 mois/an	4,2	2,7	0,4
DC ₉	débit dépassé 9 jours/an	1,2	0,77	0
DC _E	débit caractéristique d’étiage, dépassé 355 jours/an	0,38	0,13	0

Les débits caractéristiques de l’oued Inaouène subit à une variabilité spatiale de l’amont à l’aval du bassin. Les valeurs au niveau de la station d’El Kouchat sont supérieures à celles enregistrées en amont. Les étiages en amont commence dès le débit de l’oued est nul (0 m³/s) alors qu’ils apparaissent à 0,38 m³/s à El Kouchat et 0,13 m³/s à Bab Marzouka. Les crues sont puissantes en aval du bassin en vue de l’accroissement de l’aire réceptrice du bassin.

1-5- Débits journaliers : étude des situations hydrologiques particulières

En fait, l’utilisation des débits journaliers moyens de toute la série d’observation est largement critiquée, car cette méthode peut conduire à une certaine régularisation artificielle du fonctionnement hydrologique du cours d’eau considéré par compensation des années humides et sèches. Pour pallier ce problème, on va essayer au niveau de cet axe de choisir trois années représentatives respectivement de l’année normale, de l’année sèche et de l’année humide afin de caractériser réellement le fonctionnement hydrologique journalier de l’oued Inaouène dans ses différentes situations potamologiques. Dans cette optique on va opter pour les relevés hydrométriques de la station de Bab Marzouka en vue de la longueur et l’actualité de sa base de données ainsi que son homogénéité.

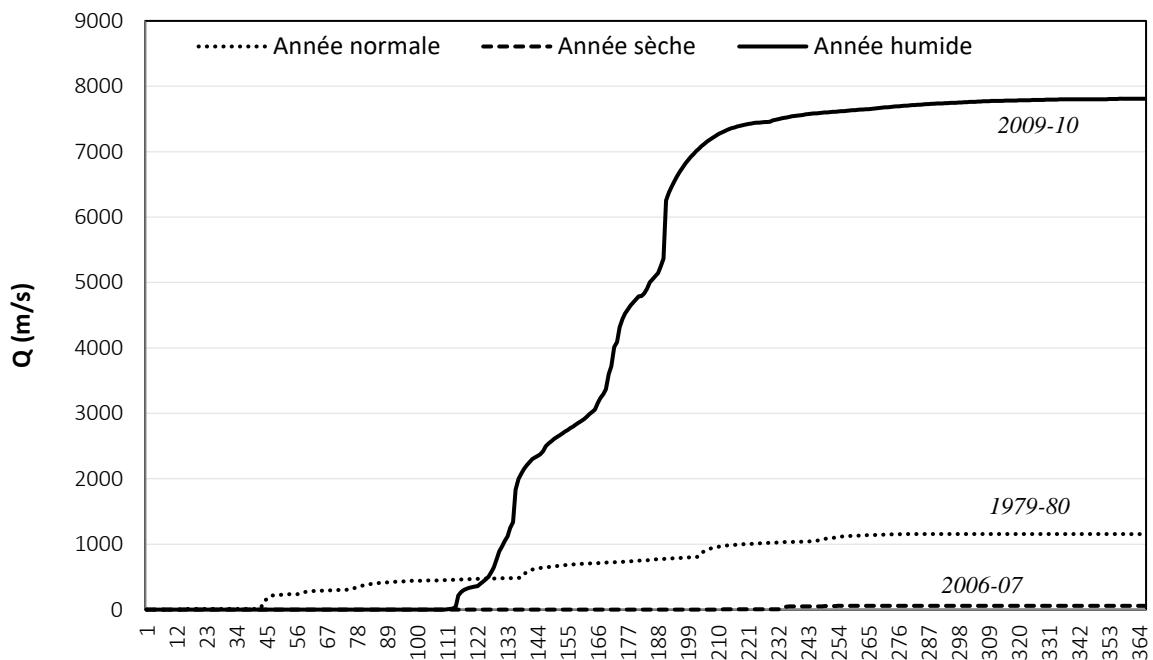


Figure 23– Courbe des débits journaliers cumulatifs des années représentatives

1-5-1- Année humide (2009-2010)

Rappelons que cette année a été caractérisée par une abondance moyenne annuelle de l'ordre de $21,6 \text{ m}^3/\text{s}$ correspondant à un volume total annuel d'eau de plus de 682 millions mètres cubes. L'écart à la moyenne est positif (314,8%), et le cumulus annuel de précipitation lui-même était important (991mm), donc elle porte toutes les manifestations d'une année humide.

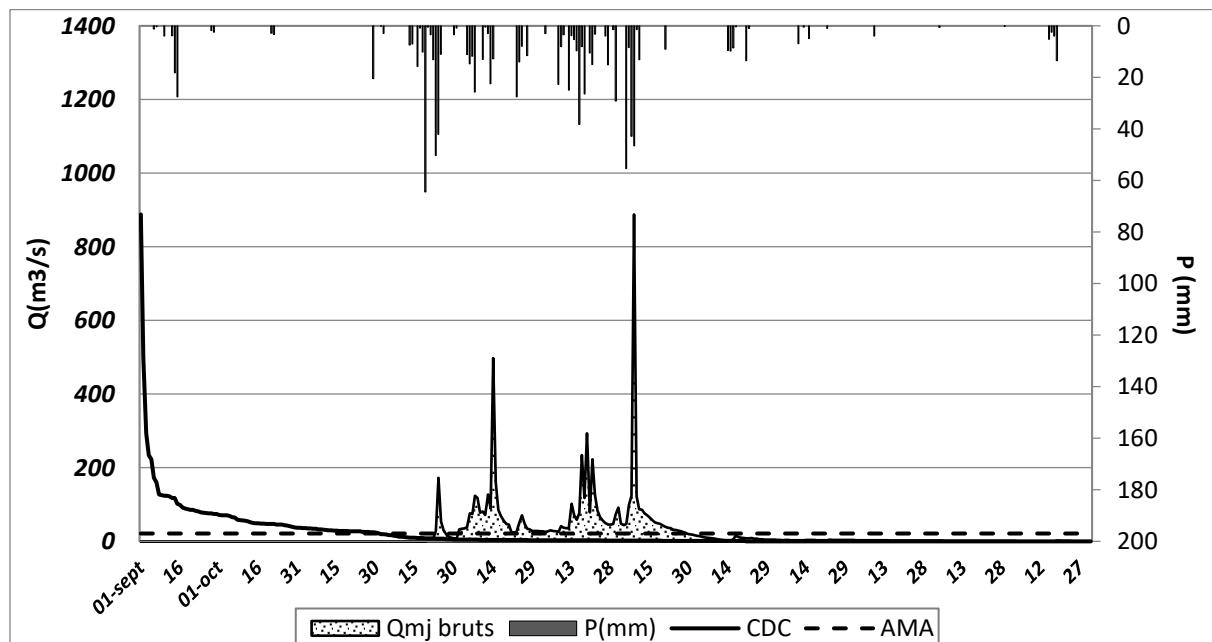


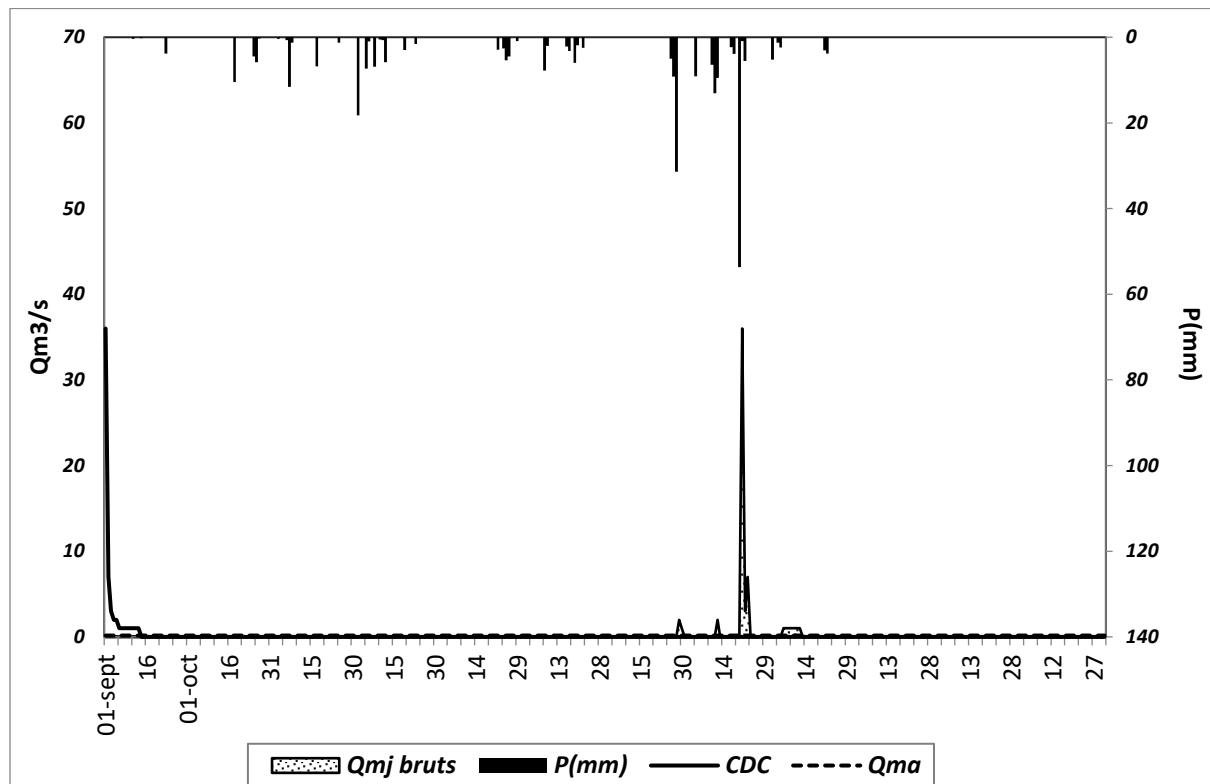
Figure 24 -Hyégramme de l'année hydrologique 2009-10 à la station de Bab Marzouka sur Inaouène

L'année humide de 2009-10 est caractérisée par de fortes variabilités journalières avec de nombreux pics de crues dont le plus important est celui de 9 mars (un débit moyen journalier de 888 m³/s). La période de hautes eaux est limitée en extension mais avec des valeurs extrêmes, et en contrepartie, la période de basses eaux et d'étiage est longue.

L'observation de la courbe des débits classés montre l'existence d'un écoulement important en volume mais limité en durée, où l'on voit une rapidité de la descente de la courbe des débits et l'installation de celle-ci dans les faibles valeurs. Le régime hydrologique de cette année est considéré comme *excessif* car il y a un grand écart entre les débits extrêmes et entre les débits caractéristiques (entre Dc10 et Dc 355 et entre Dc1 et Dc 364).

1-5-2- Année sèche (2006-07)

Cette année est caractérisée par une indigence hydrologique et pluviométrique accentuée. Le cumul annuel des précipitations est de l'ordre de 300 mm avec l'inégalité de sa distribution. L'abondance moyenne annuelle est très faible (0,16 m³/s).



L'observation de la distribution temporelle des débits journaliers représentés sur l'hydrogramme a pu mettre en évidence d'une faible variabilité journalière des débits.

L'année de 2006-07 se caractérise nettement par la prédominance des basses eaux et des étiages qui durent longtemps, alors que les forts débits sont largement brefs. La décroissance des débits classés sur l'hydrogramme reflète une descendante d'ordre vertical du fait de la brièveté des débits forts. Le type du régime d'écoulement de cette année est considéré comme *pondéré*, car l'écart entre les débits extrêmes est faible.

1-5-3- Année normale (1979-80)

Après avoir étudié les débits journaliers des années extrêmes et leur régime hydrologique (année sèche, année humide), d'abord on va étudier ceux de l'année hydrologique 1979-80 considérée comme étant une année normale au niveau hydrologique et pluviométrique ($P = 622,3 \text{ mm}$; $Q = 3,62 \text{ m}^3/\text{s}$).

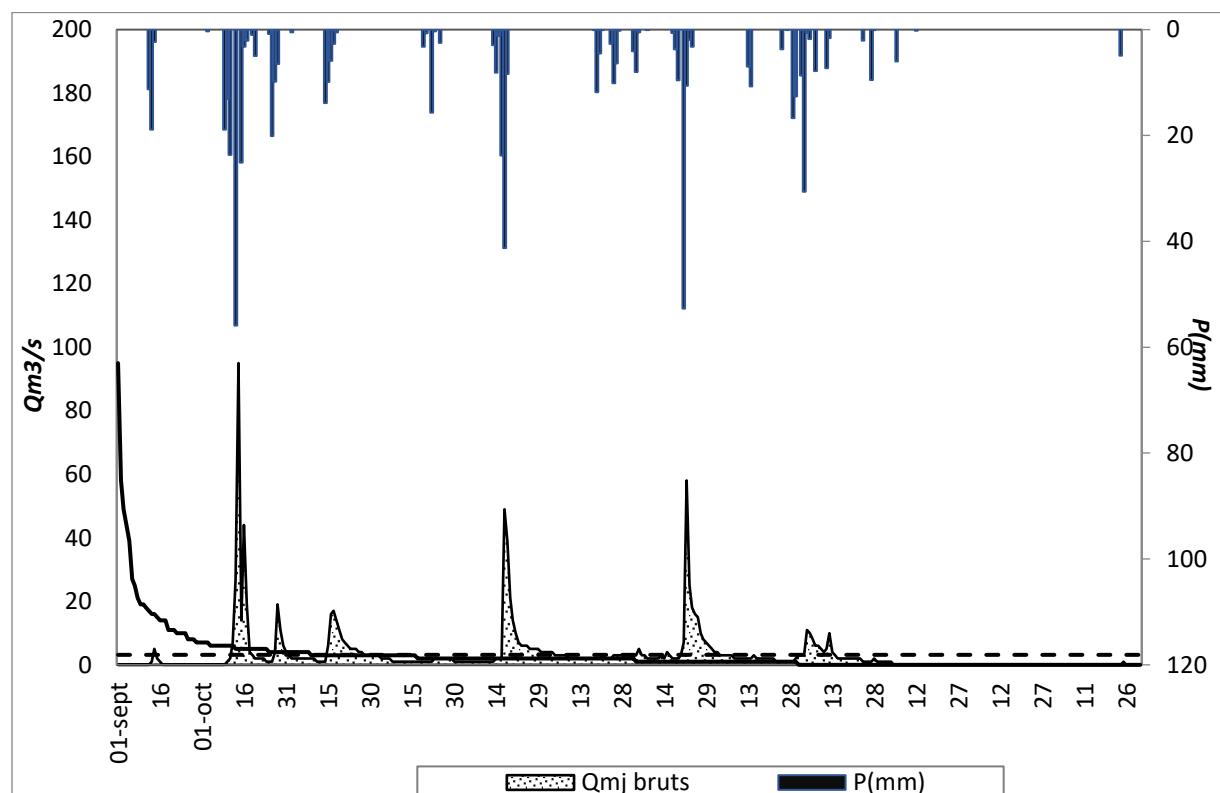


Figure 26 -Hyéogramme de l'année hydrologique 1979-80 à la station de Bab Marzouka sur Inaouène

La répartition des débits journaliers montre qu'il y a des oscillations des volumes du débit (entre 0 et 95 m^3/s). Parfois le débit augmente au-dessus de moyenne annuelle en entrant dans un état de hautes eaux voire des crues, et d'autre fois il baisse en dessous en formant des basses eaux. Le coefficient de variation de cette année égal à 2,45 et l'écart-type vaut 7,73 m^3/s .

Tableau 26 – Débits caractéristiques des années représentatives de l'oued Inaouène

<i>Débits caractéristique</i>	Année humide (2009-10)	Année sèche (2006-07)	Année normale (1979-80)
débit de crue inondante	888	36	95
débit caractéristique maximal ou débit dépassé 10 jours/an	124	1	19
débit dépassé 1 mois/an	74	0	7
débit dépassé 3 mois/an	25	0	3
débit caractéristique médian ou débit dépassé 6 mois/an	2	0	2
débit dépassé 9 jours/an	0	0	0
débit caractéristique d'étiage, dépassé 355 jours/an	0	0	0

En guise de conclusion, l'oued Inaouène est de régime excessif car les débits varient considérablement dans l'année. L'oued peut passer de 0 m³/s à 900 m³/s en une seule journée, toutefois, la période de très hautes eaux reste courte et brève. Au contraire les débits de basses eaux durent longtemps et affectent parfois les périodes d'abondance hydrologique.

2- Débits mensuels

Les débits moyens mensuels sont calculés en tenant en compte de la moyenne arithmétique des débits moyens journaliers de chaque mois. Ils permettent de décrire le régime mensuel d'écoulement et de caractériser les mois d'abondance et ceux d'indigence à partir du module annuel.

2-1- Régime mensuel des débits

Le régime permet de bien percevoir le rythme moyen de l'évolution mensuelle des débits au cours de l'année et bien entendu de juger le type du régime fluvial du bassin.

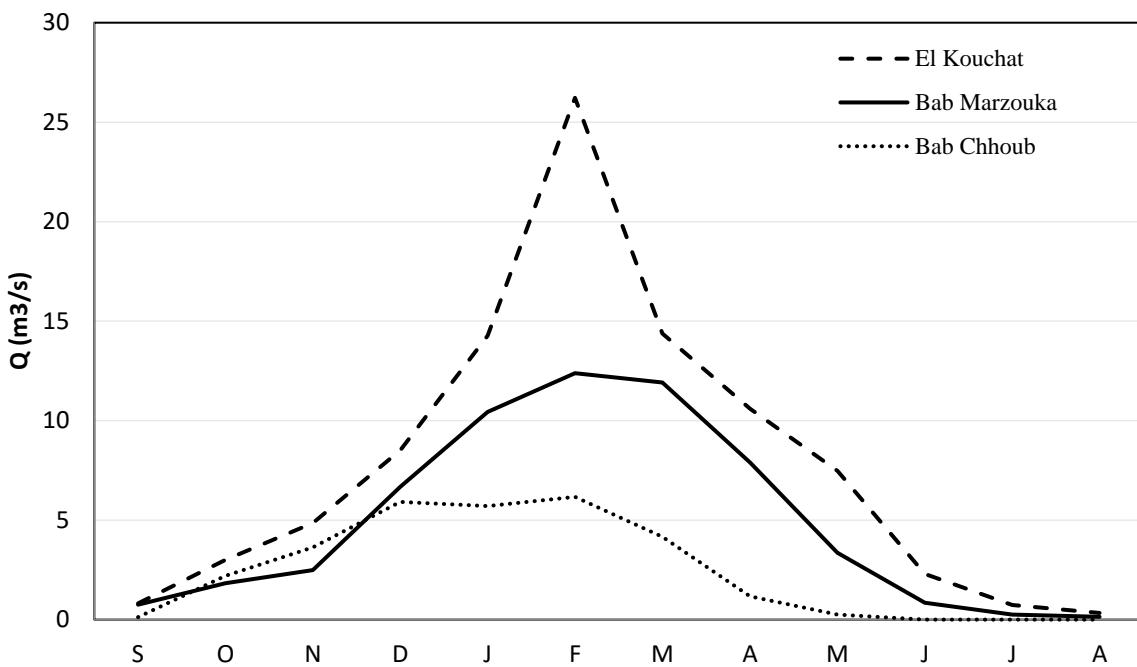


Figure 27 – Régime hydrologique mensuel de l'oued Inaouène

Station Bab Chhoub : [Durée d'observation 1987- 2011]

Station Bab Marzouka : [Durée d'observation 1971- 2013]

Station El Kouchat : [Durée d'observation 1976- 2002]

Il y a plusieurs méthodes pour classifier le régime hydrologique, on retient ici la classification proposée par M. Pardé qui est basée globalement sur deux critères principaux : 1) la simplicité ou la complexité de la courbe chronologique annuelle des débits mensuels, et 2) la nature et l'origine des hautes eaux (pluviale, nivale, glaciaire ou mixte). Cette classification distingue trois grands types : les régimes simples, les régimes mixtes et les régimes complexes.

A partir de l'observation de la courbe des débits mensuels de l'oued Inaouène dans ses différentes stations et en vue des données climatiques du bassin, il s'avère que le régime hydrologique de l'oued Inaouène est un **régime simple** parce qu'il se caractérise par un seul maximum annuel et le reste n'est que des minimums, ce qui traduit la prépondérance d'un seul mode d'alimentation (pluviale).

2-2- Coefficient mensuel des débits (CMD)

Le CMD est le rapport entre les débits moyens mensuels au débit moyen interannuel. Ce coefficient a l'avantage de comparer les débits au cours des mois, et aussi de qualifier le caractère d'un mois. Si $\text{CMD} < 1$, le mois est dit de basses eaux, à l'inverse un $\text{CMD} > 1$ le mois est de hautes eaux.

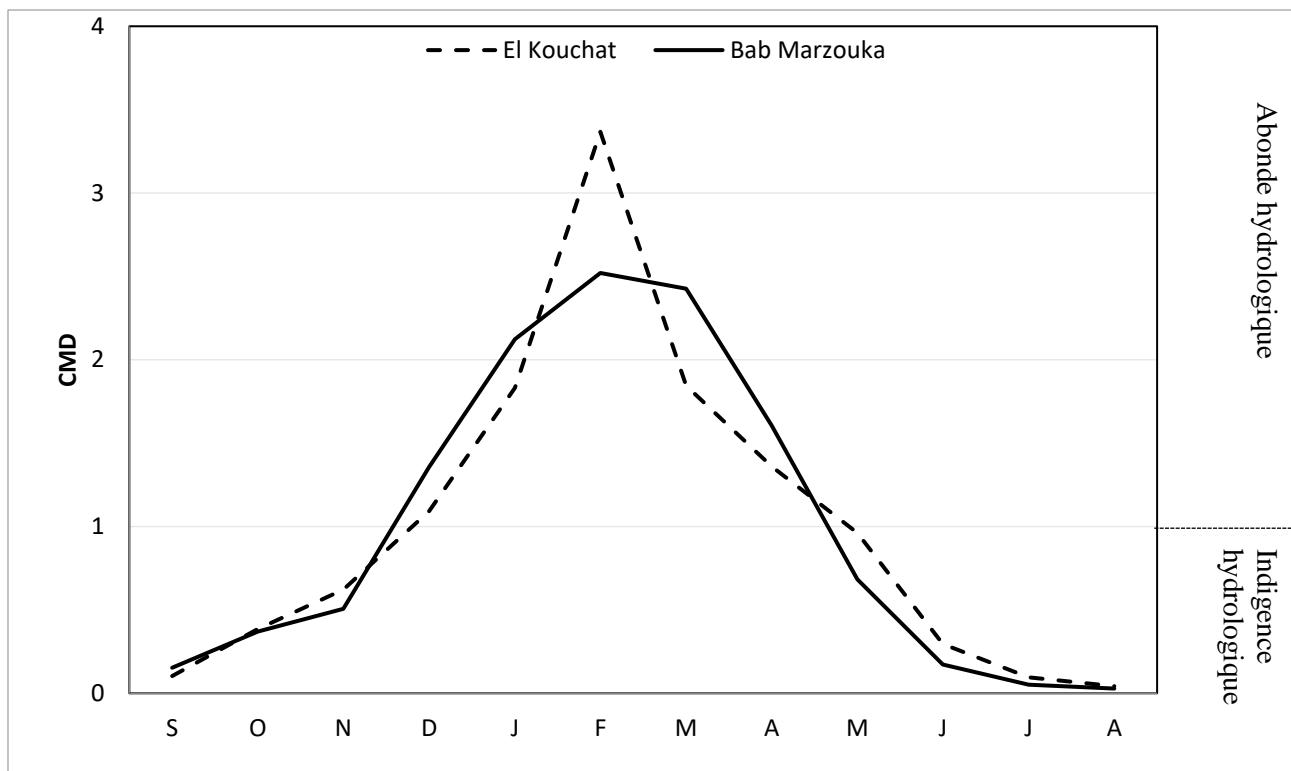


Figure 28 – Coefficient mensuel des débits de l'oued Inaouène

Station Bab Chhoub : [Durée d'observation 1987- 2011]

Station Bab Marzouka : [Durée d'observation 1971- 2013]

Station El Kouchat : [Durée d'observation 1976- 2002]

Au niveau de l'oued Inaouène, le CMD a permis de distinguer deux périodes hydrologiques distinctes par lesquelles passe l'écoulement au cours de l'année :

-période d'abondance hydrologique : pendant laquelle la pluviosité est largement suffisante pour assurer un écoulement fort, les réserves hydriques du bassin se rechargeant. Cette période subit à de légères variations spatiales surtout en ce qui concerne son début et sa fin. A la station de Bab Marzouka et à El Kouchat, l'hiver hydrologique commence de décembre à avril alors qu'à la station de Bab Chhoub elle se prolonge de novembre à mars. Ceci est dû au fait que la superficie du bassin contrôlée par la station de Bab Marzouka est dominée par des roches imperméables, donc les précipitations automnales du mois de novembre vont vite l'écoulement dès leur incidence sur le bassin.

-période d'abondance hydrologique : elle dure sept mois à partir de mai à novembre (et de avril à octobre pour Bab Chhoub). Elle correspond à de faibles débits en situation de basses et de très basses eaux. Elle constitue une phase d'épuisement des ressources en eau du bassin.

2-3- Variation interannuelle des débits mensuels

Les débits mensuels de l'oued Inaouène varient considérablement entre les années, il y a une cyclicité des périodes de hautes eaux et d'autres de basses. Les années 1978-79, 2009-10 et 2012-13 sont considérées comme étant des périodes typiques dans l'hydrologie de l'oued Inaouène puisqu'elles étaient marquées par des débits mensuels exceptionnels (123 m³/s en mars 2013, 75m³/s en janvier 2010).

Tableau 27 – Coefficient de variation des débits mensuels de l'oued Inaouène

	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
El Kouchat	164	206	118	126	144	150	132	100	128	97	122	186
Bab Marzouka	2	253	126	125	141	144	188	112	126	118	155	252
Bab Chhoub	490	428	257	187	205	218	181	109	243	0	0	0

Le coefficient de variation corrobore la forte variabilité interannuelle des débits à l'échelle mensuelle. On observe aussi que les débits estivaux de l'oued au niveau du bassin de Lahder contrôlé par la station de Bab Chhoub sont nettement invariables (coef. de variation égale à 0 %), et même chose pour la station de Bab Marzouka en septembre (2%).

Cette variation des débits mensuels est commandée évidemment par l'omniprésente instabilité du climat méditerranéen à l'échelle temporelle.

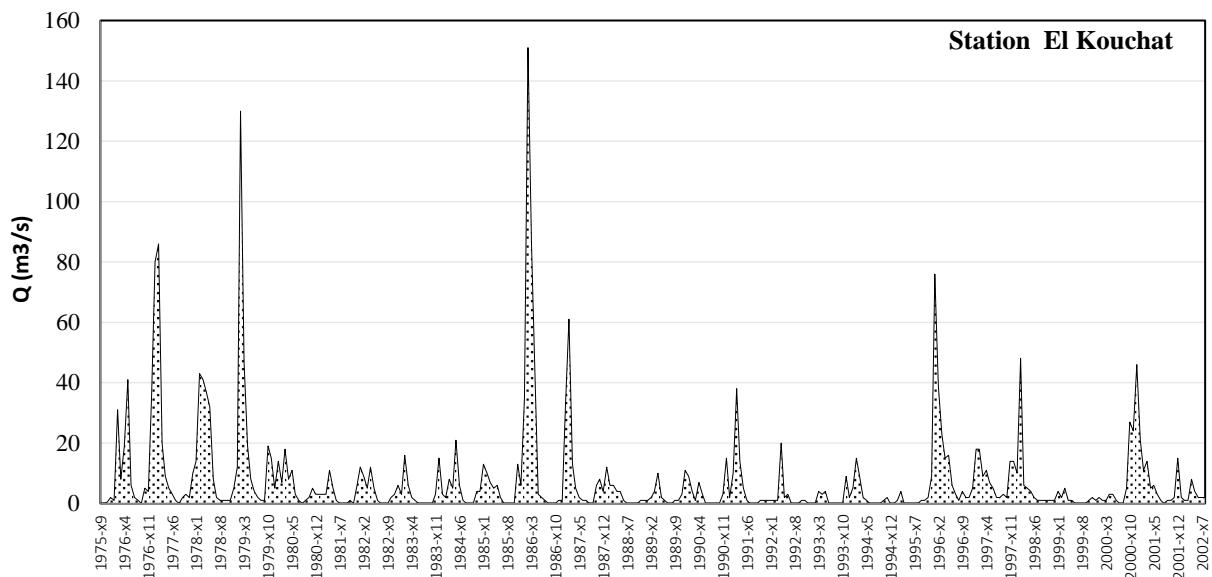


Figure 29 – Variation interannuelle des débits mensuels de l'oued Inaouène à la station hydrologique El Kouchat

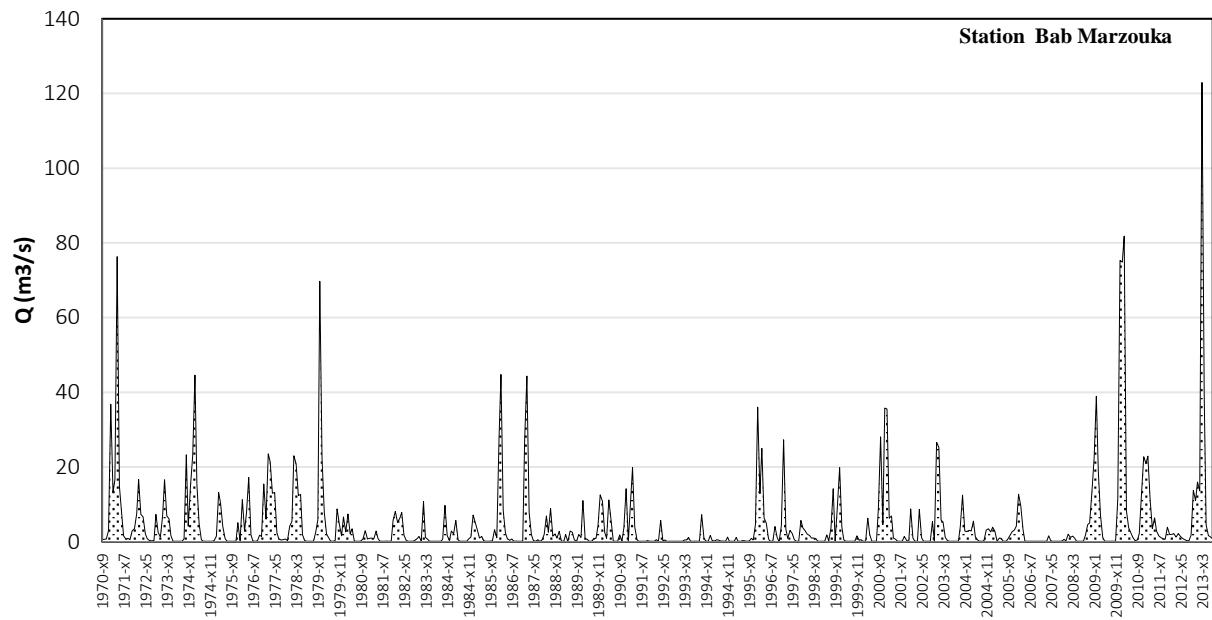


Figure 30 – Variation interannuelle des débits mensuels de l'oued Inaouène à la station hydrologique Bab Marzouka

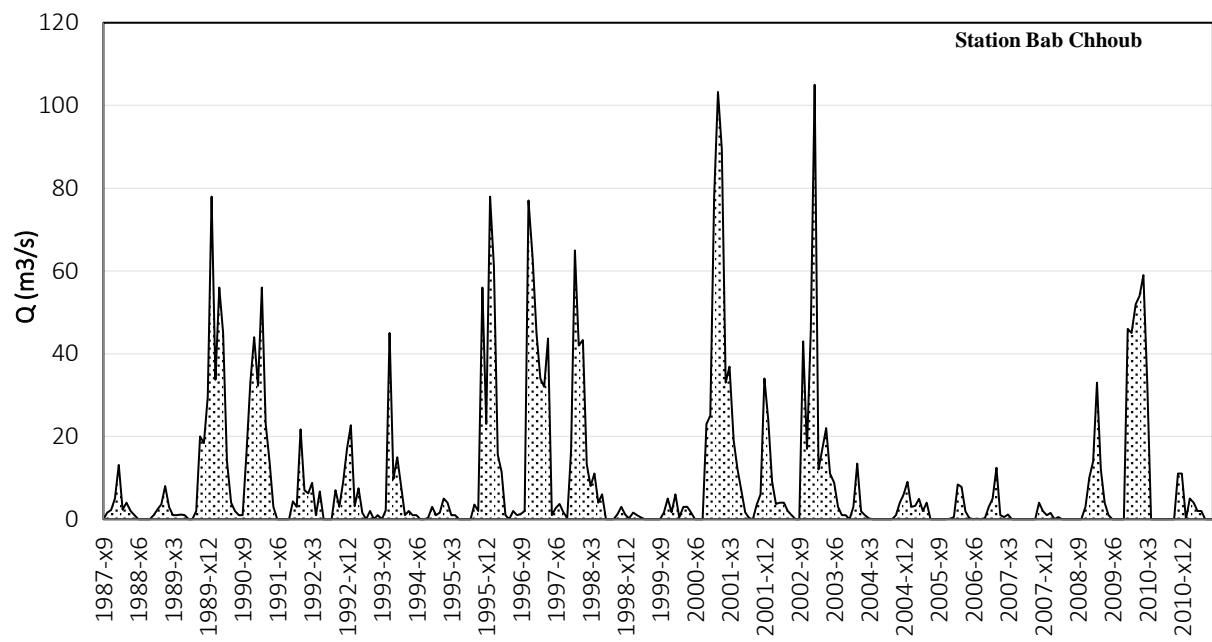


Figure 31 – Variation interannuelle des débits mensuels de l'oued Inaouène à la station hydrologique Bab Chhoub

3- Débits annuels

Rappelons que le débit annuel est le résultat de la moyenne arithmétique de tous les débits moyens journaliers. A l'échelle annuelle, on peut distinguer entre trois types des débits annuels :

- Module annuel ou particulier, qui est la moyenne des débits journaliers de l'année en question (une seule année). Il s'appelle aussi l'abondance moyenne annuelle.
- Module global : étant la moyenne des débits journaliers de quelques années (humides ou sèches ou bien normales).
- Module normal : qui la moyenne de tous les débits journaliers de la série d'observations.

3-1- Variations des modules annuels

Les modules annuels constituent une variable très représentative des volumes en m³/s qui transitingent annuellement dans les cours d'eau. Elle est donc le témoin, par excellence, de toutes les variations en matière de ressources en eau disponibles.

Les débits annuels de l'oued Inaouène connaît de grandes variations annuelles du fait du changement des lames d'eau annuelles précipitées. Le coefficient de variation (cv%) est très élevé au niveau de toutes les stations hydrométriques. Il est de l'ordre de 203% à la station de Bab Chhoub, 99% à Bab Marzouka et 89% à El Kouchat.

En 1985-86, 2009-10 et 2012-13, les débits ont atteints des valeurs exceptionnelles que ce soit au niveau journalier, mensuel et annuel. L'abondance moyenne annuelle était de l'ordre de 24,08 m³/s en 2009-10 comme valeur exceptionnelle enregistrée à l'amont de l'oued Inaouène.

De plus, les débits annuels varient aussi à l'échelle spatiale. Le module normal enregistré en aval est supérieur aux autres (il est de l'ordre de 7,8 m³/s à la station d'El Kouchat, 4,9 m³/s à Bab Marzouka et 2,4 m³/s à Bab Chhoub). Cette supériorité est due à l'augmentation de l'aire réceptrice du bassin en aval.

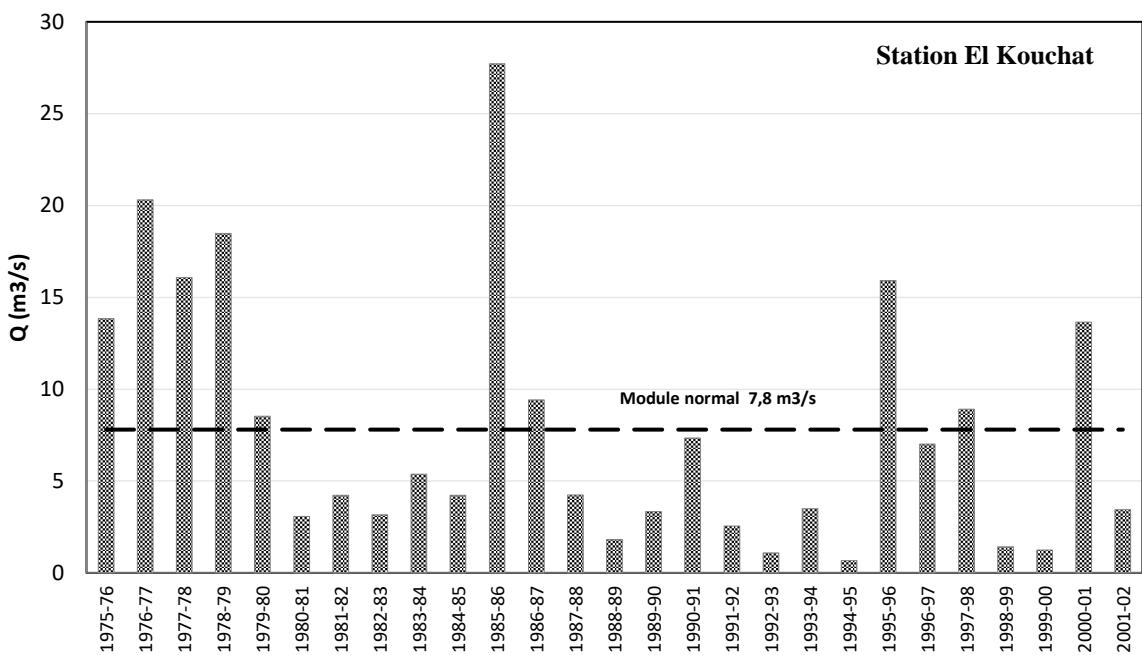


Figure 32– Variation interannuelle des débits annuels à la station hydrologique El Kouchat

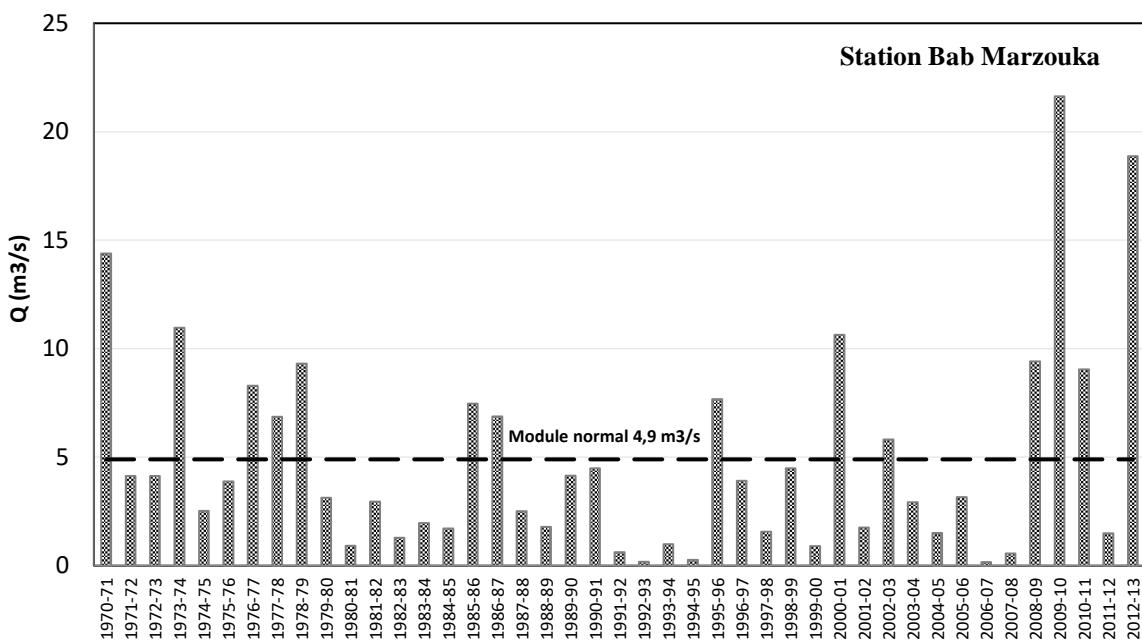


Figure 33– Variation interannuelle des débits annuels à la station hydrologique Bab Marzouka

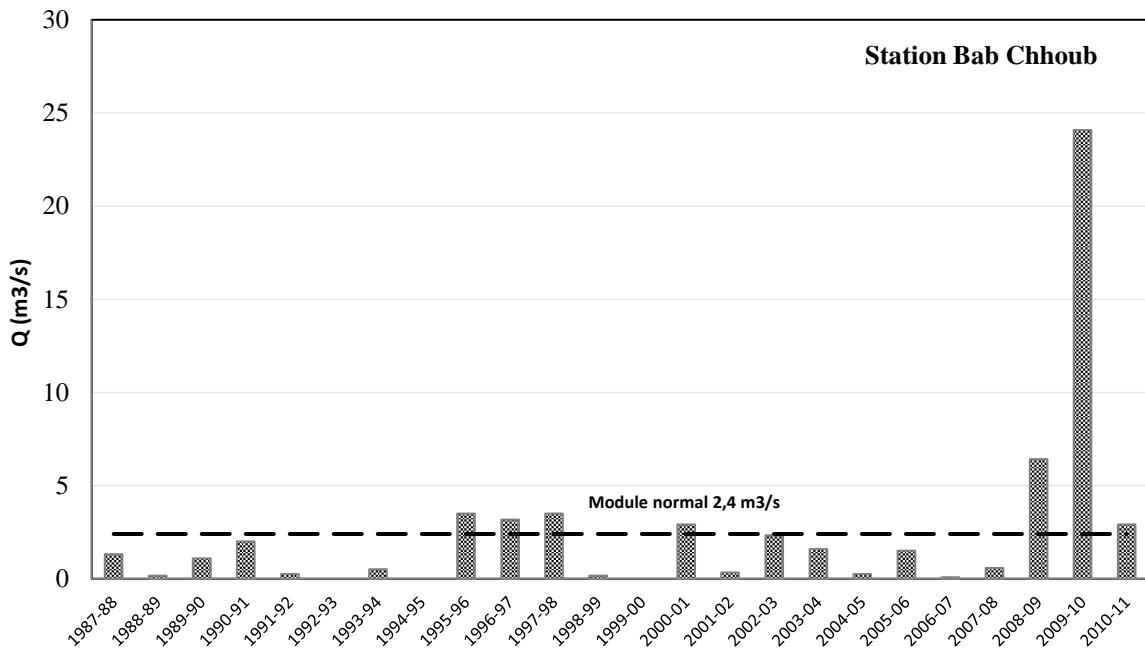


Figure 34 – Variation interannuelle des débits annuels à la station hydrologique Bab Chhoub

3-2- Méthode d'écart à la moyenne (EM)

L'utilisation de la méthode des écarts à la moyenne donne de bonnes appréciations en termes de situations hydrologiques annuelles. L'EM est déduit par la relation suivante :

$$EM (\%) = ((Q_{an} - \bar{Q}) / \bar{Q}) \times 100$$

Où EM : écart à la moyenne d'une année, Q_{an} : débit moyen de l'année, \bar{Q} : Module normal de toute la série.

Une analyse hydrologique par le coefficient EM (écart à la moyenne) pour l'oued Inaouène, a permis de ressortir statistiquement une cyclicité de deux phases hydrologiques :

-**les phases hydrologiquement excédentaires** dont les valeurs des débits annuels sont supérieures à la moyenne et l'écart à la moyenne est positif ($EM > 0$). Parmi les plus importantes celles de 2009-10, 2012-13.

-**les phases hydrologiquement déficitaires** dont les valeurs des débits sont inférieures à la moyenne, et l'écart à la moyenne est négatif ($EM < 0$), et lors de ces phases il y a une indigence hydrologique. Ces périodes fréquentent périodiquement et régulièrement l'hydrologie de l'oued Inaouène

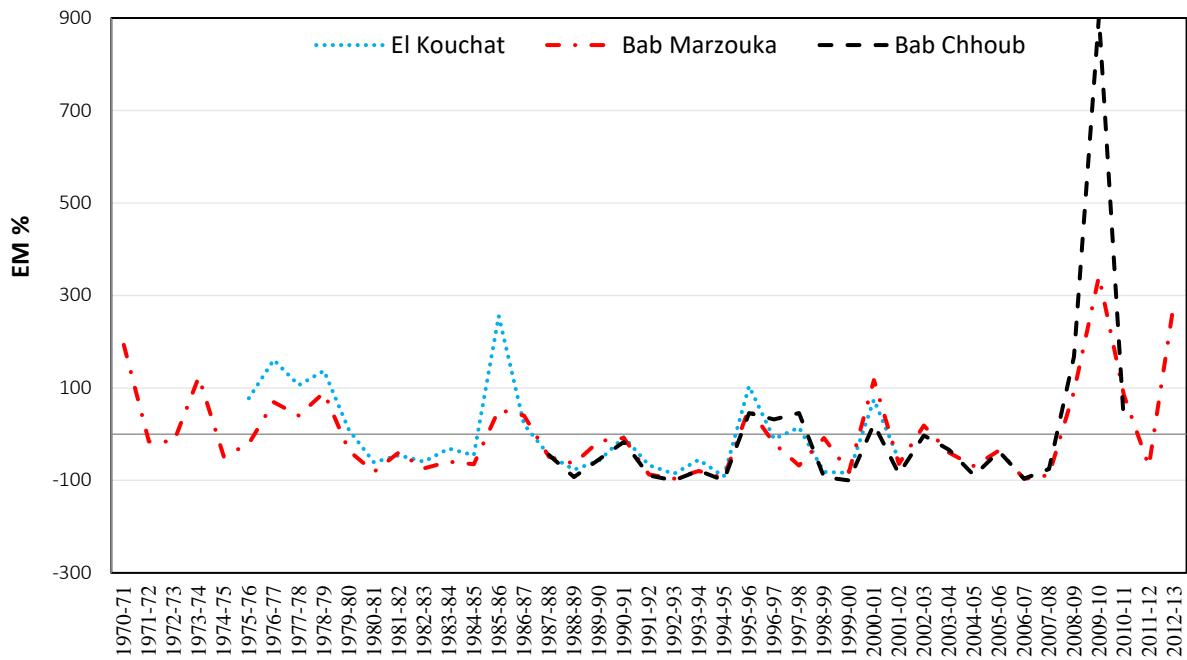


Figure 35 – Les écarts à la moyenne des débits annuels de l’Oued Inaouène

3-3- Coefficient d’hydraulicité

Ce coefficient se définit comme étant le rapport du débit moyen d’une année au module global de la série d’observation. Il exprime la variabilité interannuelle des débits. Pour un coefficient $C_H > 1$, c’est une année humide à écoulement important, et pour un $C_H < 1$ l’année devient sèche à faible écoulement.

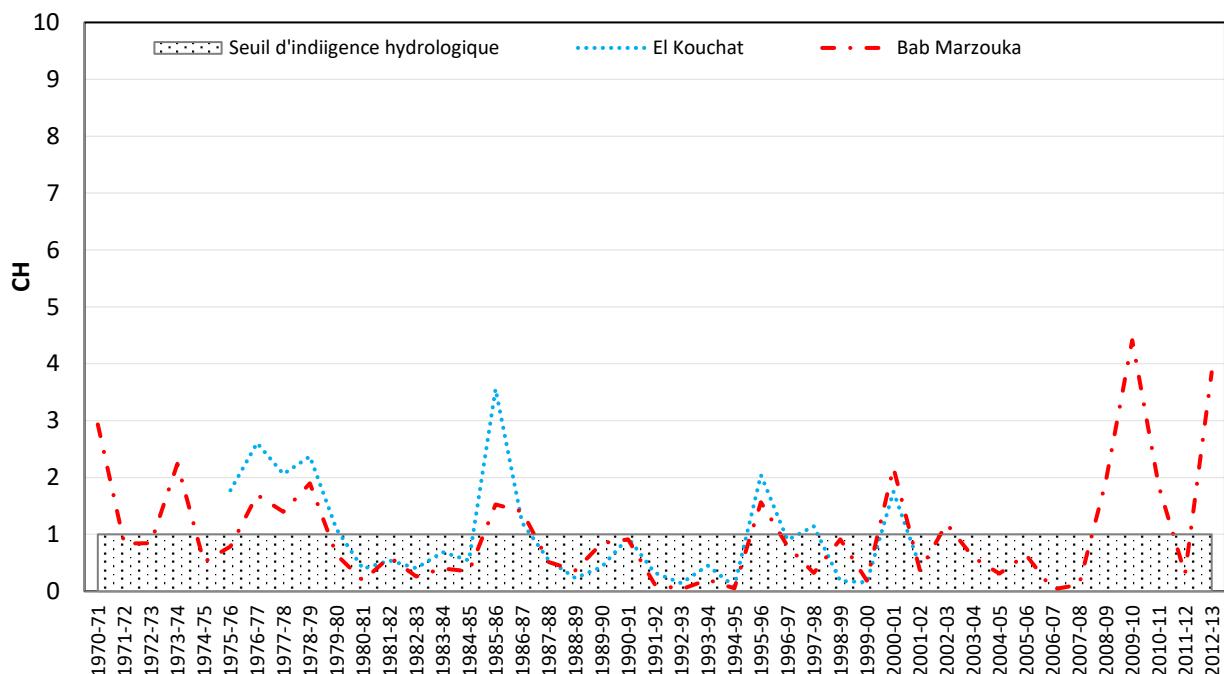


Figure 36 – Coefficient d’hydraulicité des débits de l’oued Inaouène

Le coefficient d'hydraulicité a l'avantage de comparer spatialement la variabilité des caractéristiques hydrologiques à l'échelle interannuelle. En ce qui concerne l'oued Inaouène, il s'avère que son écoulement se voit en situation d'indigence plus qu'en abondance, malgré le fait qu'il y a une cyclicité qui se coïncide nettement avec la variabilité des précipitations annuelles. Environ 70% des années d'observation sont des années déficitaires surtout à la station de Bab Chhoub et de Bab Marzouka en contrepartie d'un pourcentage de 63% en aval du bassin à la station d'El Kouchat.

3-4- Relation précipitations-débits annuels

Les conditions climatiques et notamment la pluviosité jouent un rôle essentiel dans l'écoulement fluvial. Elle constitue l'élément crucial de l'abondance ou de l'indigence en écoulement, et bien entendu de la régularité ou l'irrégularité des débits.

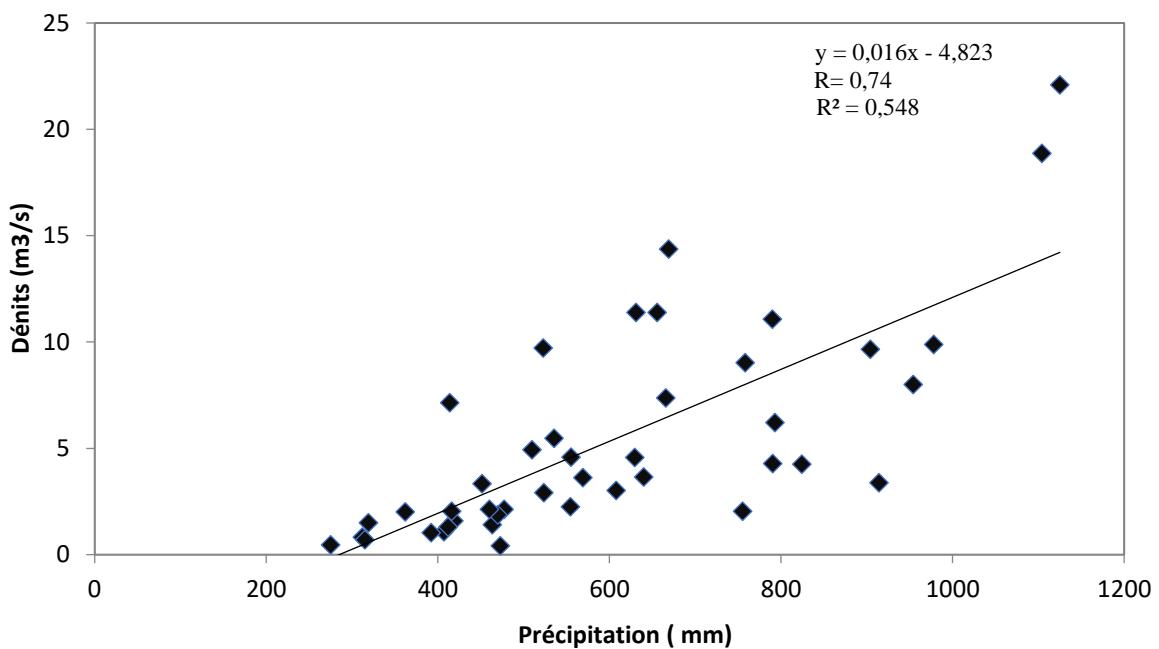


Figure 37 - Corrélation entre les pluies et les débits de l'oued Inaouène à la station de Bab Marzouka
Station Bab Marzouka : [Durée d'observation 1971- 2013]

Le coefficient de corrélation entre les précipitations et les débits annuels est important, il est de l'ordre de 0,74, ceci confirme le fait que la pluviosité joue un rôle essentiel dans l'écoulement du bassin de l'O. Inaouène. De sorte que plus les précipitations soient élevées, plus que les débits sont importants, bien que d'autres paramètres physiographiques interviennent.

Conclusion du chapitre

En conclusion, on peut dire que le fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène est spécifique en raison de sa forte variabilité temporelle. Les écarts entre les extrêmes sont très grands ce qui reflète les fortes valeurs du coefficient d'immodération. Cette particularité est omniprésente partout les zones méditerranéennes et se constate sur toutes les échelles temporelles.

Sur le plan annuel, les valeurs des débits observés connaissent de grandes fluctuations annuelles. Certaines années ont été hydrologiquement exceptionnelles soit en raison des grandes valeurs enregistrées (années de 1970-71 et 2009-10) ou de l'indigence hydrologique observée (1994-95 et 2006-07). Les différents indices de variabilité corroborent cette variation temporelle que ce soit à la station d'amont ou d'aval.

A l'échelle mensuelle on a pu séparer deux saisons hydrologiques dans le régime de l'oued d'Inaouène : l'hiver et l'été. L'hiver hydrologique est distingué par l'abondance des ressources en eau, les pertes en eau sont inférieures aux apports pluviaux, le coefficient mensuel des débits est supérieur à 1, et inversement en période d'été. La courbe mensuelle des débits montre un seul pic qui s'enregistre en février et elle se flétrit progressivement vers les autres mois. Cette particularité est typique dans les régimes hydrologiques pluviaux.

Finalement, en ce qui concerne le fonctionnement journalier on observe clairement des grandes fluctuations dans la courbe des débits journaliers. L'écart entre les minimums et les maximums est colossal ce qui reflète encore une fois l'hétérogénéité de la répartition temporelle des débits. La courbe des débits classés montre une descente brutale des débits à partir de quelques fortes valeurs et ensuite sa stabilisation sur de faibles débits, ceci corrobore la concentration chronologique des fortes valeurs de débits.

Conclusion de la Deuxième Partie

Dans cette partie de la mémoire de recherche on a traité deux éléments hydrologiques essentiels : le bilan hydrologique du bassin d'étude et le fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène. Leur étude constitue une étape primordiale dans la compréhension et la caractérisation de l'hydrologie de l'oued Inaouène.

D'abord, le bilan hydrologique du bassin d'Inaouène a été analysé de deux côtés temporels. A l'échelle mensuelle, Le bilan de l'oued se caractérise par l'individualisation de deux périodes distinctes : un été hydrologique allant de mai à octobre, et un hiver hydrologique allongé sur les autres mois. Pendant la première phase le déficit d'écoulement est fort, l'ETP est exponentielle et les réserves en eau sont en plein épuisement. En contrepartie, lors de la saison humide les réserves en eau se reconstituent et lames écoulées à l'exutoire sont de plus en plus importantes. A l'échelle annuelle, l'estimation des termes du bilan montre que le bassin d'Inaouène est en situation de stress hydrique parce que les stocks en eau sont négatifs (le bassin perd de l'eau) et la majorité de la lame précipitée part à l'évapotranspiration.

En ce qui concerne le fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène et les caractéristiques de son régime, on constate que les débits de l'oued varient grandement que ce soit à l'échelle temporelle ou spatiale. Spatialement, les débits bruts de l'oued Inaouène augmentent de l'amont vers l'aval du fait de l'augmentation de l'aire réceptrice du bassin et du nombre d'affluents qui alimentent le cours principal. A l'échelle temporaire, il y a quatre niveaux de variations. Les débits journaliers varient considérablement, le rythme de variation est imprédictible, le nombre de jours où les débits sont en étiages ou en très basses eaux est beaucoup plus fréquents mais il y a toujours une interruption au cours de cette réparation, en raison de l'intervention des pluies surtout en hiver et début printemps. Au niveau mensuel, on distingue deux périodes hydrologiques différentes, un hiver hydrologique caractérisé par des débits importants et qui s'allonge de décembre à avril et un été hydrologique plus ou moins sec allant de mai à novembre. A l'échelle annuelle, les débits changent grandement d'une année à l'autre en fonction des changements annuels de la pluviométrie.

Troisième partie

Étude des situations extrêmes de l'écoulement de l'oued Inaouène (étiages et crues)

Introduction générale

Chapitre 5 :

Les étiages de l'oued Inaouène : caractérisation et variations spatio-temporelles

Chapitre 6 :

Crues de l'Oued Inaouène : caractérisation et variations spatio-temporelles

Conclusion de la partie

Introduction de la Troisième Partie

Au cours de l'année hydrologique, les débits du cours d'eau peuvent à la fois atteindre de grandes valeurs et décroître pour atteindre des valeurs faibles voire nulles. Pendant cette variabilité, deux phénomènes hydrologiques peuvent se succéder, même s'ils ne sont pas de même occurrence :

- Premièrement, il s'agit des étiages. Ceux-ci sont des événements hydrologiques résultant d'une sécheresse climatique longue, et ils sont caractérisés par une chute significative des niveaux d'eau dans les cours d'eau durant une longue durée (plusieurs mois).
- Le deuxième phénomène se produit généralement en hiver, par d'exceptionnels gonflements des eaux dans les cours d'eau sous forme des crues et inondations.

Cette partie est l'un des maillons principaux de ce travail. Il aborde l'étude des formes extrêmes de l'écoulement que prend l'oued Inaouène dans son fonctionnement temporel. Dans cette optique, on va commencer premièrement par l'analyse des très basses eaux qui ont lieu généralement en période d'été, et après les très hautes eaux qui se produisent de façon brève et irrégulière. L'étude de ces événements présente un grand intérêt dont le principal la compréhension du comportement hydrologique de l'oued Inaouène pendant les phases d'abondance en eau ou de sécheresse.

En ce qui concerne l'étude des crues, le problème majeur est d'arriver à faire la distinction entre les débits des hautes eaux normales et ceux des crues qui sont généralement des événements inhabituels qui produisent des modifications plus ou moins importante dans la morphologie de la plaine alluviale. Dans cette partie on essaiera d'estimer les différentes crues de l'oued Inaouène et de caractériser leur variation. De plus, on consacrera une section à l'étude de l'allure des crues à partir d'un hydrogramme afin de qualifier la réponse hydrologique de l'oued et les différentes phases de crues.

L'étude des étiages consiste à caractériser leur seuils, période d'apparition et variation spatio-temporelle entre les années et les différents secteurs du bassin d'Inaouène. Pour cela, différentes méthodes statistiques ont été développées pour caractériser les étiages et les conditions hydrogéologiques qui y sont liées. Cependant, la diversification des méthodes suscite la perplexité pour le choix des meilleures approches qui peuvent convenir au terrain d'étude.

Chapitre 5

Etiages de l'oued Inaouène : caractérisation et variations spatio-temporelles

Sommaire

Introduction

1-Caractérisation des étiages

1-1- L'analyse de l'étiage extrême annuel (EEA)

1-2- Débit caractéristique d'étiage (DCE)

1-3- Débit mensuel d'étiage (QMMA)

2-Analyse des débits d'étiage en période de tarissement

2-1- Détermination de la période de tarissement

2-1-1- La méthode des « courbes enveloppes »

2-1-2- La méthode des « courbes séquences »

2-1-3- La méthode des « courbe des débits décroissants »

2-2- Tarissement hydrologique et types caractéristiques d'étiages

2-2-1- Tarissements extraits par la méthode de la courbe des débits décroissants

2-2-2- Comparaison des tarissements obtenus par les différentes méthodes d'extraction

Conclusion du chapitre

Introduction

Le climat du bassin d’Inaouène se distingue par une variabilité temporelle plus ou moins irrégulières. En revanche, à l’échelle mensuelle cette variation est régulière de sorte qu’il y ait un étalement de la sécheresse sur certains mois allant de mai jusqu’à septembre. En période d’arrêt continu des pluies, les réserves hydriques tendent à s’épuiser selon un rythme plus ou moins contrôlé par les conditions hydrogéologiques du bassin et évènements pluviométriques antérieurs.

Cette période de sécheresse impacte sur les volumes d’eau en transit de l’oued Inaouène et on constate une apparition des étiages avec des débits très bas voire nuls. Pourtant, le problème qui se pose pendant cette période est la distinction entre les basses eaux ordinaires de l’oued et les débits des étiages qui expriment un état de stress hydrique fluvial. Plusieurs méthodes statistiques ont été développées afin de définir les seuils des étiages, que l’on peut appeler critères d’étiages, de sorte que chacun exprime un niveau donné d’étiage (EEA, DCE, QME). La caractérisation de l’oued Inaouène sera basée sur ces critères statistiques.

Une autre approche pour l’étude des étiages très intéressante en soi sera également adoptée dans le cadre de cette étude. Il s’agit-là de l’analyse des étiages en période de tarissement hydrologique, c’est-à-dire au moment où les pluies et en arrêt total, les réserves hydriques du bassin sont en cours d’épuisement avec une décroissance plus ou moins progressive des débits de l’oued. Une analyse à cette échelle permet par conséquent de caractériser le rythme de tarissement et sa dépendance des conditions climatiques dominantes, et bien entendu de quantifier les réserves hydriques emmagasinées du bassin d’Inaouène.

1- Caractérisation des étiages

Face à la complexité des étiages et la difficulté leur distinction des basses eaux ordinaires, on va opter pour l’utilisation simultanée de plusieurs expressions numériques des étiages. Cette approche permet de mieux caractériser les étiages et d’atténuer les erreurs parce qu’elle permet l’élaboration de plusieurs types de variables d’étiage. Chacune de ces variables possède un cadre temporel (échelle) différent. Cette approche multidimensionnelle améliore les gains d’informations et la connaissance des réalités hydrologiques des cours d’eau en question.

Pour caractériser les étiages de l’oued Inaouène, nous avons choisi les critères ou expressions numériques d’étiage suivants :

- **L'étiage extrême annuel** : c'est le débit journalier le plus bas d'une année hydrologique (le niveau minimum de l'année). Il est appelé aussi l'étiage absolu ;
- **L'étiage caractéristique** est le niveau le plus bas atteint pendant 10 jours. Il est appelé aussi débit caractéristique d'étiage (**DCE**) de chaque année ;
- **Le débit mensuel d'étiage observé** ou le débit mensuel minimum de l'année hydrologique ;
- **L'étiage caractéristique moyen (DCE moyen)** de plusieurs années ou d'une longue période ;
- **L'étiage exceptionnel minimum** est le minimum absolu atteint sur plusieurs années ou une longue période.

Il faut noter que chacun de ces critères a des limites. Un critère peut mettre en évidence la gravité (la profondeur) de l'étiage mais il ne peut pas mesurer nécessairement la durée de l'étiage, surtout en sachant que les dégâts socio-économiques et écologiques dépendent souvent de la longévité de l'étiage et non de sa profondeur. C'est pourquoi il vaut mieux les utiliser ensemble pour bien aborder le phénomène d'étiage.

1-1- L'analyse de l'étiage extrême annuel (EEA)

La variable des étiages extrêmes annuels exprime bien la profondeur des étiages du cours d'eau, parce qu'elle est créée par des valeurs extrêmes minimums observées durant chaque année hydrologique.

Les valeurs de l'EEA de l'oued Inaouène, reflètent bien la gravité des étiages et le durcissement des conditions hydrologiques plus la pression anthropique à la fin du fonctionnement naturel du système hydrologique. Les étiages extrêmes annuels subissent eux-mêmes à une variabilité spatiale entre l'amont et l'aval. A la station d'aval, les débits d'étiages sont relativement moins aigus par rapport à la station de Bab Marzouka contrôlant la haute vallée d'Inaouène.

Les EEA de l'oued dans la période d'observations dont on dispose, s'oscillent entre 0 et 0,7 m³/s. Deux périodes particulières dans la potamologie de l'oued Inaouène ont été marquées par des étiages très creux :

- La période entre 1972-73 et 1979-80 : des débits d'étiages nuls ont été observés au niveau de la station de Bab Marzouka corroborant la présence des conditions de sécheresse accentuées.

- La période de 1996-97 en 2007-08 : encore une fois la station de Bab Marzouka enregistre des valeurs nulles alors qu'en aval à El Kouchat les débits ont aussi frôlé le seuil de 0 m³/s mais sans qu'ils y stagnent.

Tableau 28– Valeurs d'étiages extrêmes annuels (EEA) au niveau de l'oued Inaouène

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Bab Marzouka</i>	<i>El Kouchet</i>	<i>Années hydrologiques</i>	<i>Bab Marzouka</i>	<i>El Kouchat</i>
1971-72	0,137	-	1992-93	0,074	0,31
1972-73	0	-	1993-94	0,021	0,5
1973-74	0	-	1994-95	0	0,25
1974-75	0	-	1995-96	0	0,2
1975-76	0	-	1996-97	0	0,02
1976-77	0,185	0,70	1997-98	0	0,002
1977-78	0	0,50	1998-99	0	0,02
1978-79	0	0,30	1999-00	0	0
1979-80	0	0,60	2000-01	0	0,01
1980-81	0,128	0,40	2001-02	0	0,02
1981-82	0,107	0,20	2002-03	0	-
1982-83	0,055	0,20	2003-04	0	-
1983-84	0,006	0,12	2004-05	0	-
1984-85	0,012	0,30	2005-06	0	-
1985-86	0,025	0,20	2006-07	0	-
1986-87	0,022	0,60	2007-08	0	-
1987-88	0,012	0,70	2008-09	0	-
1988-89	0	0,30	2009-10	0	-
1989-90	0,013	0,20	2010-11	0,16	-
1990-91	0,101	0,41	2011-12	0,27	-
1991-92	0,018	0,15	2012-13	0,19	-

*- absence des relevés

Dans le cours d'eau de l'oued Inaouène, les étiages extrêmes annuels ont fréquemment lieu les mois de septembre, octobre, juillet et août. En effet, cette période de l'année est largement dominée par la sécheresse (estivale). En contrepartie, le mois de mars et avril n'enregistrent aucun étiage extrême en raison des précipitations printanières finales. La moyenne interannuelle des étiages extrêmes annuels est de l'ordre de 0,037 m³/s au niveau de la station de Bab Marzouka et 0,28 m³/s à El Kouchat.

Tableau 29 - Période d'apparition des étiages extrêmes annuels

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Aoû.
Fréquence (%)	21	14	12	5	2	1	0	0	3	6	15	20

1-2- Débit caractéristique d'étiage (DCE)

Le DCE exprime bien la profondeur des étiages. Il correspond au débit classé de 355^{ème} jour, valeur comme un seuil à partir duquel commencent les débits d'étiage.

Au contraire de l'EEA abordé au début, les DCE atténuent la marge d'erreur et améliorent la qualité des données hydrométriques. Ils amortissent aussi les étiages brutaux et accidentels dont la genèse est provoquée par des facteurs naturels ou anthropiques non habituels (prélèvements temporaires, siphonage, colmatage des sources fluviales, etc.) (K. OBDA, 2007). En effet, les basses eaux et les étiages non accidentels diminuent lentement et progressivement, car les débits d'étiage sont issus des seules nappes souterraines en voie d'épuisement, de tarissement.

Tableau 30– Débits caractéristiques d'étiage (en m³/s) au niveau de l'oued Inaouène

Années hydrologiques	Bab Marzouka	El Kouchat	Années hydrologiques	Bab Marzouka	El Kouchat
1971-72	0,189	-	1992-93	0,088	0,31
1972-73	0	-	1993-94	0,034	0,5
1973-74	0	-	1994-95	0	0,25
1974-75	0	-	1995-96	0	0,2
1975-76	0	-	1996-97	0	1
1976-77	0,185	0,7	1997-98	0	0,02
1977-78	0	0,7	1998-99	0	0,22
1978-79	0	1	1999-00	0	0,02
1979-80	0	0,7	2000-01	0	0,1
1980-81	0,129	0,5	2001-02	0	0,04
1981-82	0,124	0,2	2002-03	0	-
1982-83	0,06	0,2	2003-04	0	-
1983-84	0,006	0,2	2004-05	0	-
1984-85	0,012	0,3	2005-06	0	-
1985-86	0,027	0,2	2006-07	0	-
1986-87	0,023	0,6	2007-08	0	-
1987-88	0,017	0,75	2008-09	0	-
1988-89	0,042	0,40	2009-10	0	-
1989-90	0,033	0,20	2010-11	0,29	-
1990-91	0,178	0,45	2011-12	0,32	-
1991-92	0,019	0,15	2012-13	0,21	-

Les DCE de l'oued Inaouène présentent des valeurs très faibles (au maximum 0,75 m³/s). Il y a une légère augmentation des débits DCE au niveau d'El Kouchat par rapport à la station d'Amont. A la première, ces DCE varient entre 0 et 0,75 m³/s avec une moyenne interannuelle de 0,38 m³/s alors qu'à Bab Marzouka ils s'oscillent entre 0 et 0,189 m³/s avec une moyenne qui frôle le 0,047 m³/s. En moyenne, les DCE se coïncident en 54% avec les valeurs des étiages extrêmes annuels.

1-3- Débit mensuel d'étiage (QMMA)

Le débit mensuel d'étiage est le débit mensuel minimum observé durant chaque année hydrologique. L'avantage du cadre mensuel est l'atténuation presque totale des erreurs d'observation non systématique. Ce critère masque complètement les étiages accidentels qui sont des phénomènes potamologiques réels de courte durée. En revanche, il ne peut pas mettre en relief de la profondeur des étiages car les débits journaliers d'un mois peuvent être marqués par des crues qui corrompent les valeurs réelles des étiages.

1-3-1- QMMA à l'échelle interannuelle

La première constatation concernant les débits mensuels d'étiage, c'est que ceux-ci sont très significatifs par rapport aux DCE et EEA. En effet, les QMNA ne sont que des moyennes mensuelles minimales qui rassemblent des débits faibles et autres forts, donc ils s'influencent par les caractéristiques hydrologiques de l'année en question et l'existence ou absence des gros débits pendant le mois considéré.

Au niveau de la station de Bab Marzouka, les débits mensuels d'étiage varient légèrement d'une année à l'autre (entre 0,001 et 0,446 m³/s), alors qu'à la station d'El Kouchat ils varient grandement à l'échelle interannuelle, avec des QMMA compris entre 0,21 et 2 m³/s. En effet, plus on dirige vers l'aval plus la superficie du bassin s'agrandit et plus alors les débits augmentent. En conséquence, dans le bassin inférieur du cours d'eau la variation des débits en fonction du climat est plus forte qu'à l'amont du bassin.

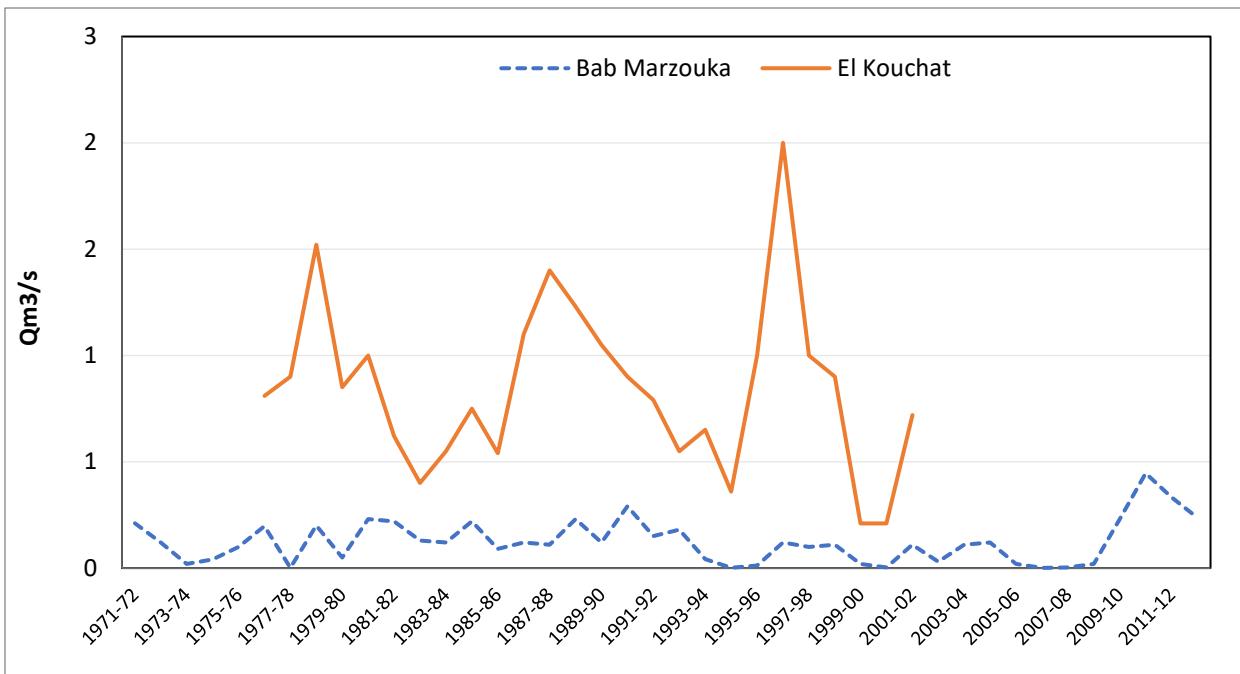


Figure 38 – Débits mensuels d'étiage de l'oued Inaouène

1-3-2- Période d'apparition

Au niveau de l'oued Inaouène, l'apparition des débits mensuels d'étiage se limitent sur les mois de juillet, août, septembre et octobre. Pourtant, les apparitions se concentrent sur août et septembre (86%). En effet, le mois août représente la fin de l'année hydrologique où les réserves hydriques sont en plein épuisement, et la même chose également pour septembre où le système hydrologique est encore en tarissement et influencé par la sécheresse des mois précédents.

Tableau 31 – Apparition des débits mensuels d'étiage

Mois d'apparition	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Fréquence (%)	10	50	36	5

1-3-3- Débits spécifiques mensuels d'étiage

La conversion des débits mensuels d'étiage en débits spécifiques d'étiage permet une meilleure comparaison entre les stations hydrométriques et de savoir l'évolution spatiale des étiages.

La première constatation dans cette optique, c'est qu'il y a une anomalie dans l'évolution spatiale des étiages. Sur l'oued Inaouène, les débits spécifiques d'étiage augmentent plus en

allant vers l'aval. Le principal élément explicatif de cet inversement, c'est le rôle des effluents des eaux urbains issus de la ville de Oued Amlil qui atténuent la profondeur des étiages et augmentent les débits enregistrés à l'aval.

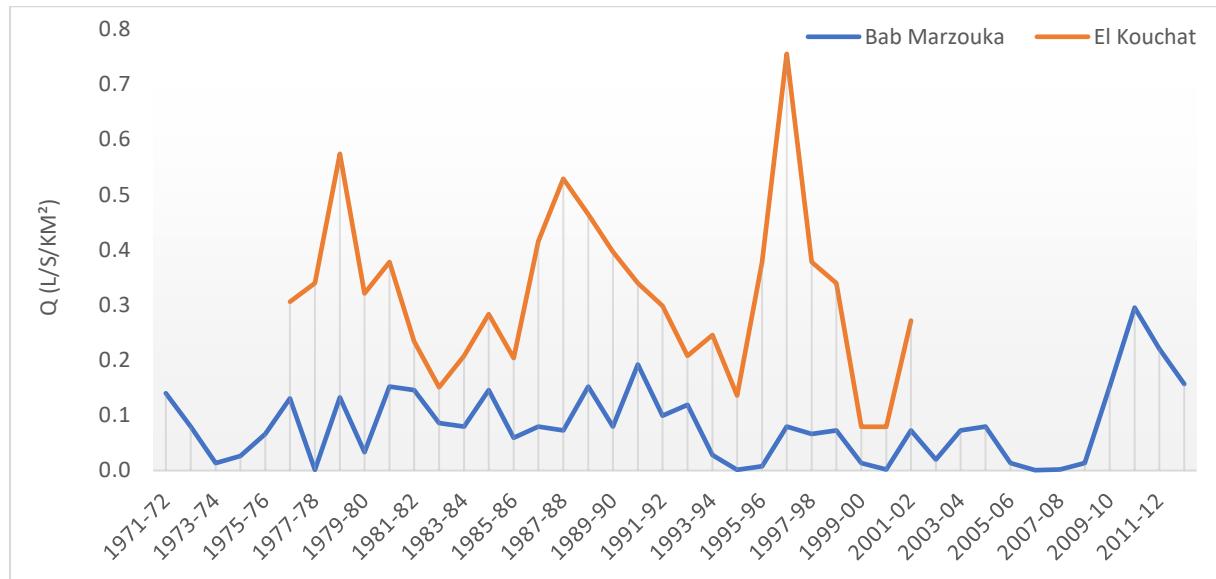


Figure 39 – Débits spécifiques mensuels d'étiage

1-3-4- Indice de sévérité d'étiage (ISE)

L'emploi de l'indice ISE permet de mettre en évidence les différences au niveau de la profondeur des étiages mensuels. Les étiages sont très sévères lorsque ce coefficient est faible. L'ISE est exprimé en pourcentage et se déduit par la relation suivante :

$$ISE = \frac{\text{débit mensuel d'étiage}}{\text{Module de la période}} \times 100$$

A partir de l'indice ISE on constate que les étiages observés en station d'amont (Bab Marzouka) sont plus sévères par rapport à ceux enregistrés en aval. Au niveau de la station d'El Kouchat les valeurs d'ISE ne baissent en aucune année en-dessous de 2 alors qu'à Bab Marzouka les ISE sont à plusieurs reprises au-dessous de 1. Cette variabilité spatiale peut s'expliquer par le fait que la réponse hydrologique en amont est rapide, une fois les pluies s'arrêtent les débits eux-mêmes se décroisent proportionnellement. En revanche, à l'aval du bassin la réponse est lente du fait de l'allongement de la forme du bassin et la longévité du parcours d'acheminement d'eau.

La sévérité varie autant à l'échelle interannuelle, où il y a des années dont l'ISE est très faible comme le cas de 1977-78, 1994-95 et 2006-07. Les ISE de l'oued Inaouène dépendent fortement des conditions hydro-climatiques intra-annuelle de l'année hydrologique en question.

Tableau 32 – Variation spatio-temporelle de l'indice de sévérité des étiages

<i>Années hydrologiques</i>	<i>Bab Marzouka</i>	<i>El Kouchat</i>	<i>Années hydrologiques</i>	<i>Bab Marzouka</i>	<i>El Kouchat</i>
1971-72	4,31	-	1992-93	3,7	7,1
1972-73	2,45	-	1993-94	0,9	8,3
1973-74	0,41	-	1994-95	0,0	4,6
1974-75	0,82	-	1995-96	0,2	12,8
1975-76	2,04	-	1996-97	2,4	25,6
1976-77	4,04	10,4	1997-98	2,0	12,8
1977-78	0,04	11,5	1998-99	2,2	11,5
1978-79	4,08	19,5	1999-00	0,4	2,7
1979-80	1,02	10,9	2000-01	0,1	2,7
1980-81	4,69	12,8	2001-02	2,2	9,2
1981-82	4,49	7,9	2002-03	0,6	-
1982-83	2,65	5,1	2003-04	2,2	-
1983-84	2,45	7,1	2004-05	2,4	-
1984-85	4,49	9,6	2005-06	0,4	-
1985-86	1,84	6,9	2006-07	0,0	-
1986-87	2,45	14,1	2007-08	0,1	-
1987-88	2,24	17,9	2008-09	0,4	-
1988-89	4,69	15,8	2009-10	4,7	-
1989-90	2,45	13,5	2010-11	9,1	-
1990-91	5,92	11,5	2011-12	6,8	-
1991-92	3,06	10,1	2012-13	4,8	-

Nous rappelons que l'objectif de recourir à l'emploi simultané de plusieurs critères, aux échelles temporelles différentes, est l'approfondissement de l'étude des étiages par l'élimination des inconvénients de chacun de ces critères choisis tout en profitant de ces avantages.

2- Analyse des débits d'étiage en période de tarissement

Dans cet axe on va faire une analyse des étiages de l'oued Inaouène lorsque celui-ci est en phase de tarissement, c'est-à-dire au moment où les cours d'eau sont uniquement alimentés par la vidange des nappes aquifères. Des courbes de tarissement, partie de l'hydrogramme générée par les seuls écoulements souterrains sans influence de précipitation, seront aussi mises en évidence pour caractériser le rythme de décroissance des débits et sa relation avec les types d'étiage.

2-1- Détermination de la période de tarissement

La méthode d'extraction des phases consiste à sélectionner les débits en décroissance durant les phases non influencées par les précipitations. Parmi les approches les plus utilisées dans la bibliographie citons les suivantes :

2-1-1- La méthode des « courbes enveloppes »

Cette première méthode, classiquement utilisée par les opérateurs, consiste à relier les points bas d'un hydrogramme s'alignant en échelle semi-logarithmique (figure ci-dessous). Le graphique montre que cette méthode intègre, au sein d'une même phase, des remontées de débits qui peuvent être liées à des épisodes pluvieux. Le tracé des courbes enveloppes s'inscrit donc dans une démarche empirique pour laquelle les épisodes de tarissement sélectionnés vont souvent résulter des choix ou des possibilités offertes à l'opérateur.

2-1-2- La méthode des « courbes séquences »

Cette méthode de sélection présente l'avantage de l'homogénéité de l'échantillon, mais subordonne la durée des épisodes de tarissement aux conditions climatiques. Ainsi, par la méthode des courbes séquences, on retient des débits de tarissement généralement sur une courte durée, susceptibles sans doute d'être influencés par la vidange de la zone non saturée. Toutes les séquences pouvant être observées sont donc retenues, pourvu qu'elles répondent à des critères de sélection garantissant le caractère du tarissement.

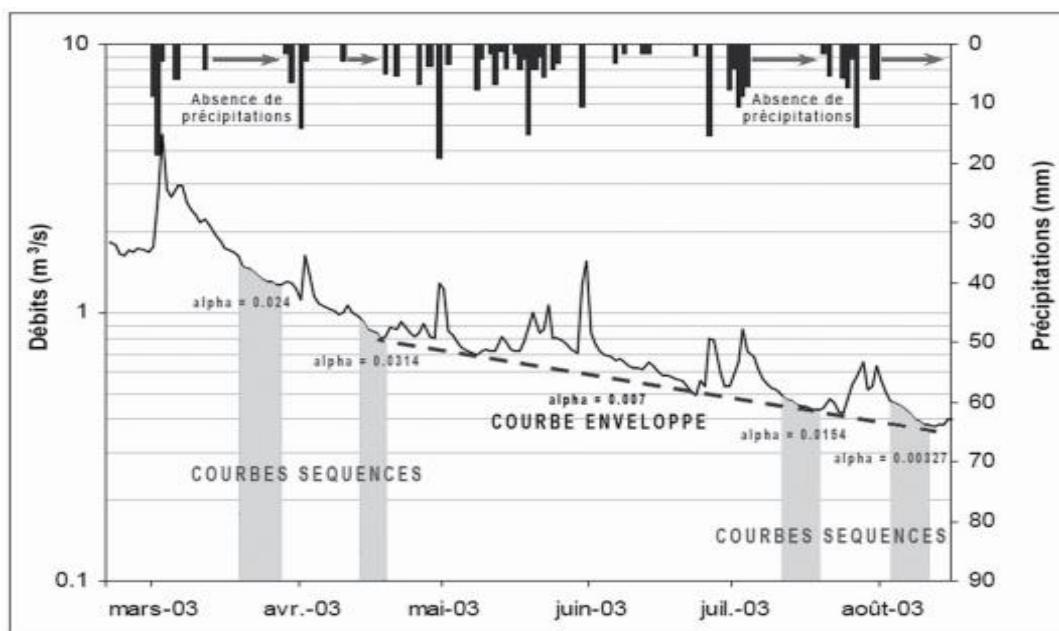


Figure 40 – Exemple de courbe enveloppe de tarissement et de courbe de séquences de tarissement (modifié d'après Lang & Gilles, 2006)

2-1-3- La méthode des « courbe des débits décroissants »

Faute de manque des données journalières des précipitations pour savoir les périodes non influencées par les pluies, on peut se contenter de la méthode de la courbe des débits décroissants. Elle consiste à sélectionner les débits en décroissance pendant les périodes sèches de l'année. Bien que la période de tarissement retenue par cette approche puisse être influencée par les pluies, mais l'aspect temporel est bien conservé de sorte que les débits retenus soient consécutifs.

Dans le cadre de cette étude on a opté pour l'utilisation de la méthode des courbes des débits décroissants car elle est bien adapté au contexte local et le manque des données pluviométriques à disposition. En fait, on ne possède que des observations journalières des pluies d'une seule station (Bab Marzouka) située dans une altitude basse (398 m) alors que les averses ont lieu souvent dans les zones hautes du bassin.

2-2- Tarissement hydrologique et types caractéristiques d'étiages

La caractérisation des types d'étiage de l'Oued Inaouène semble bien adaptée à celle proposée par M. PARDE (1964, 1968) et reprise par R. FREQAUT (1972), qui opposent entre eux, les étiages "peu marqués", les étiages "atténus", les étiages "très marqués", et les étiages "quasi-permanents". Cette caractérisation considère le débit de 1 m³/s comme le seuil de débit d'entrée en étiage, et s'établie en fonction des chutes des débits de basses eaux et d'étiage dans la courbe de tarissement.

Tableau 33 - Types caractéristiques d'étiage, et vidange des nappes (D'après Abdelghani GARTET)

<i>Caractéristiques des débits d'étiage</i>	<i>Ressuyage des sols et vidange des nappes</i>	<i>Débits d'étiages caractéristiques</i>
<i>Ecoulement non influencé</i>	Vidange du réseau hydrographique et ressuyage des sols	$\geq 1,5 \text{ m}^3$
<i>Basses eaux ordinaires</i>	Ressuyage des sols et vidanges des nappes superficielles	[1,5 - 1 m ³ /s]
<i>Etiage peu marqué</i>	Vidange des nappes subsuperficielles	[1 - 0,6 m ³ /s]
<i>Etiage atténué</i>	Vidange des nappes phréatiques	[0,6 - 0,2 m ³ /s]
<i>Etiage très marqué</i>	Vidange des nappes profondes	[0,2 - 0,03 m ³ /s]
<i>Etiage quasi-permanent</i>	Vidange des nappes profondes	$\leq 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$

A chaque tarissement on quantifie le rythme de vidange des réserves hydrologiques tout en utilisant le coefficient de tarissement (α) et aussi le coefficient de vidange des nappes (V) pour permettre une bonne idée sur la vitesse d'épuisement des aquifères en pourcentage.

$$\alpha = (\ln Q_0 - \ln Q_t) / t$$

$$V (\%) = (1 - e^{-\alpha}) * 100$$

Où : $\alpha (j^{-1})$ = coefficient de tarissement

$V (\%)$ = coefficient de vidange des nappes

Q_0 : débit initial de tarissement

Q_t : débit de fin de tarissement

T : durée de tarissement

À partir de coefficient α on peut calculer aisément le volume des *réservoirs émmagasinées* (appelées réserves hydrologiques, Cosandey & Robinson, 2000) dans le bassin versant d'Inaouène par la relation suivante (Réméniéras, 1974) :

$$R = Q_0 / \alpha$$

R : volume des réservoirs hydrologiques (m³)

Q_0 : Débit initial du tarissement

α : Coefficient de tarissement

2-2-1- Tarissements extraits par la méthode de la courbe des débits décroissants

Après avoir examiné la base de données hydrologiques disponible et son adéquation avec les critères de périodes de tarissement, on a décidé de travailler sur deux années hydrologiques exemplaires de tarissement, en l'occurrence celle de 1981-81 et 1987-88.

A- Tarissements longs : cas de 1981

L'année de 1981 a été caractérisée par une sécheresse climatique aigue qui a provoqué un tarissement progressif des réserves hydriques du bassin d'Inaouène sur à l'échelle de plusieurs mois. Le coefficient d'hydraulicité de cette année varie entre 0,2 et 0,4. Le tarissement de 1981 a été distingué par un grand écartement entre les extrêmes. A la station de Bab Marzouka le tarissement a commencé par une valeur de 12,8 m³/s en finissant par rejoindre la valeur de 0,128 m³/s alors qu'à l'aval le tarissement se bascule entre 21,4 et 0,4 m³/s.

La décroissance des débits se fait d'une manière progressive et lente et les types d'étiages générés sont différents entre la station de Bab Marzouka et celle d'El Kouchat. Les types

d'étiage à la station de Bab Marzouka sont grossièrement des étiages très marqués et étiages atténués (83 jours), alors qu'au niveau d'El Kouchat l'oued Inaouène a spécialement enregistré des étiages atténués et autres peu marqués (69 jours). Le rythme de tarissement des réserves en eau est presque pareil au niveau de deux stations. Il est de l'ordre de $0,037 \text{ m}^3/\text{s/j}^{-1}$ à Bab Marzouka et $0,032 \text{ m}^3/\text{s/j}^{-1}$ à El Kouchat. Ainsi, le volume total de réserves emmagasinées dans l'amont du bassin vaut 346 m^3 . En allant vers laval, juste au niveau d'El Kouchat, la superficie augmente et le volume des réserves s'accroît également à 668 m^3 (soit 322 m^3 de différence pour 1137 km^2 de plus).

Tableau 34 – Fréquence (%) et durée des types d'étiage pendant le tarissement de 1981

Types d'étiage	Bab Marzouka		El Kouchat	
	Nombre de jours	Fréq. %	Nombre de jours	Fréq. %
Ecoulement non influencé	7	6	38	31
Basses eaux ordinaires	12	10	16	13
Etiage peu marqué	20	16	25	20
Etiage atténué	37	30	44	36
Etiage très marqué	46	38	0	0
Etiage quasi-permanent	0	0	0	0

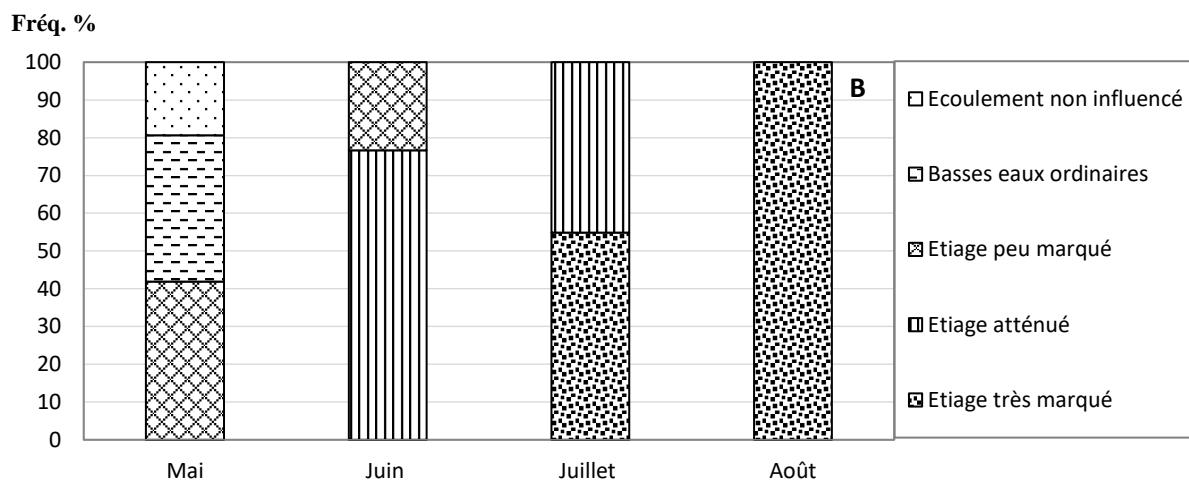


Figure 41 – Fréquence des types d'étiage pendant le tarissement de 1981.

A : station d'El Kouchat – B : station de Bab Marzouka

B- Tarissements courts : cas de 1988

La situation climatique de l'année de 1988 est considérée comme normale au niveau de la pluviométrie (669 mm à Taza). Elle a enregistré de nombreuses phases de crues et de décrue, et entre août et septembre un tarissement de courte durée (24 jours) a été observé suite à une sécheresse saisonnière estivale généralisé sur tout le bassin. A partir d'un débit initial de l'ordre de 2,5 m³/s à Bab Marzouka et 4,2 m³/s à la station d'El Kouchat, l'oued Inaouène voit ses débits se décroître progressivement jusqu'à un niveau de quasi-stagnation de l'eau dans le chenal d'étiage, seul de petits débits (de 0,072 à 0,2 m³/s) s'en écoulement à travers.

Le coefficient de vidange des nappes lors de tarissement de 1988 qualifie le rythme de décroissance comme étant relativement rapide (11 à 15%). Avec ce rythme les débits de l'oued Inaouène décroissent de 0,154 m³/s (à Bab Marzouka) chaque jour. Le volume des réserves en eau du bassin quantifié au cours du tarissement est 16,23 m³ à la haute vallée et 33,3 m³ à la basse vallée (au niveau d'El Kouchat).

Les types caractéristiques d'étiages qui ont marqué la phase sont majoritairement des étiages très marqués et étiages atténus. A la station d'amont à Bab Marzouka on voit un passage direct de l'écoulement de stade de basses eaux ordinaires aux étiages de types atténus sans avoir passé de stade étiages peu marqués. Ceci s'explique par la rapidité de décroissance des débits qui est claire en amont qu'en aval. De même le raccourcissement de la durée de tarissement n'a pas permis à l'écoulement de baisser à un point critique qualifié "étiages quasi-permanents".

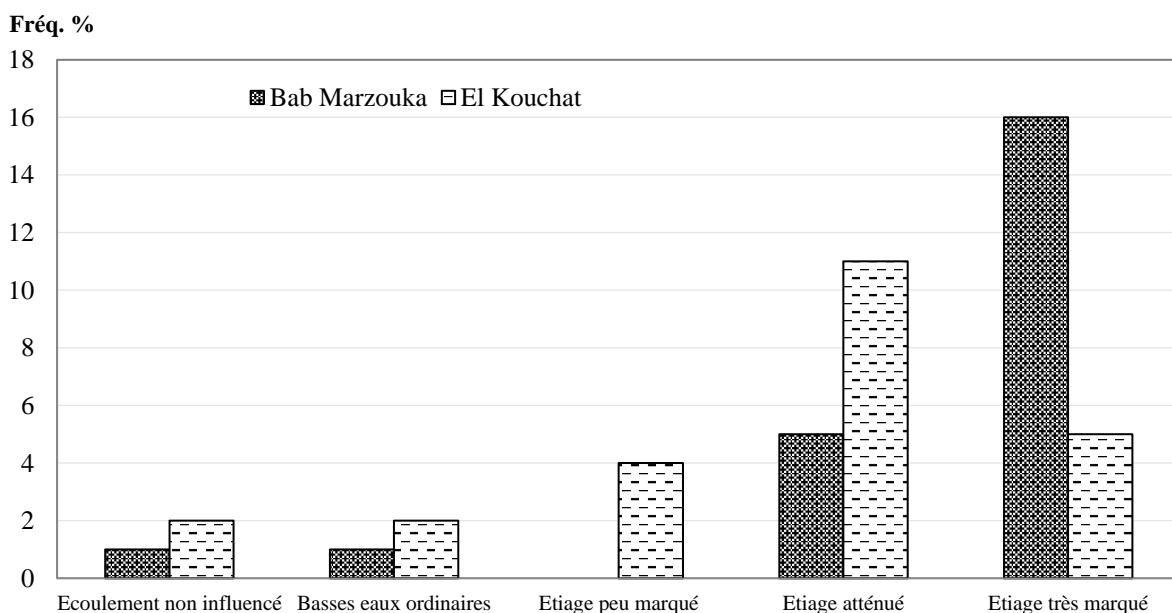


Figure 42 – Fréquence des types d'écoulement pendant le tarissement de 1988 au niveau des deux stations de l'oued Inaouène

Tableau 35 – Propriétés hydrologiques et hydrogéologiques des tarissements de 1981 et 1988

	Tarissemement de 1981		Tarissemement de 1988	
	Bab Marzouka	El Kouchat	Bab Marzouka	El Kouchat
Durée de tarissement	122	123	23	24
Débit initial (Q_0)	12,8	21,4	2,5	4,2
Débit de fin de tarissement (Q_t)	0,128	0,4	0,072	0,20
Débit moyen de tarissement (Q_{tm})	0,654	2,09	0,292	0,717
Coefficient Tarissement (a)	0,037	0,032	0,15	0,13
Coefficient Vidange (V)	3,63%	3,14%	14,2	11,8
Réservoirs emmagasinés ($R \text{ m}^3$)	346	668	16,23	33,3

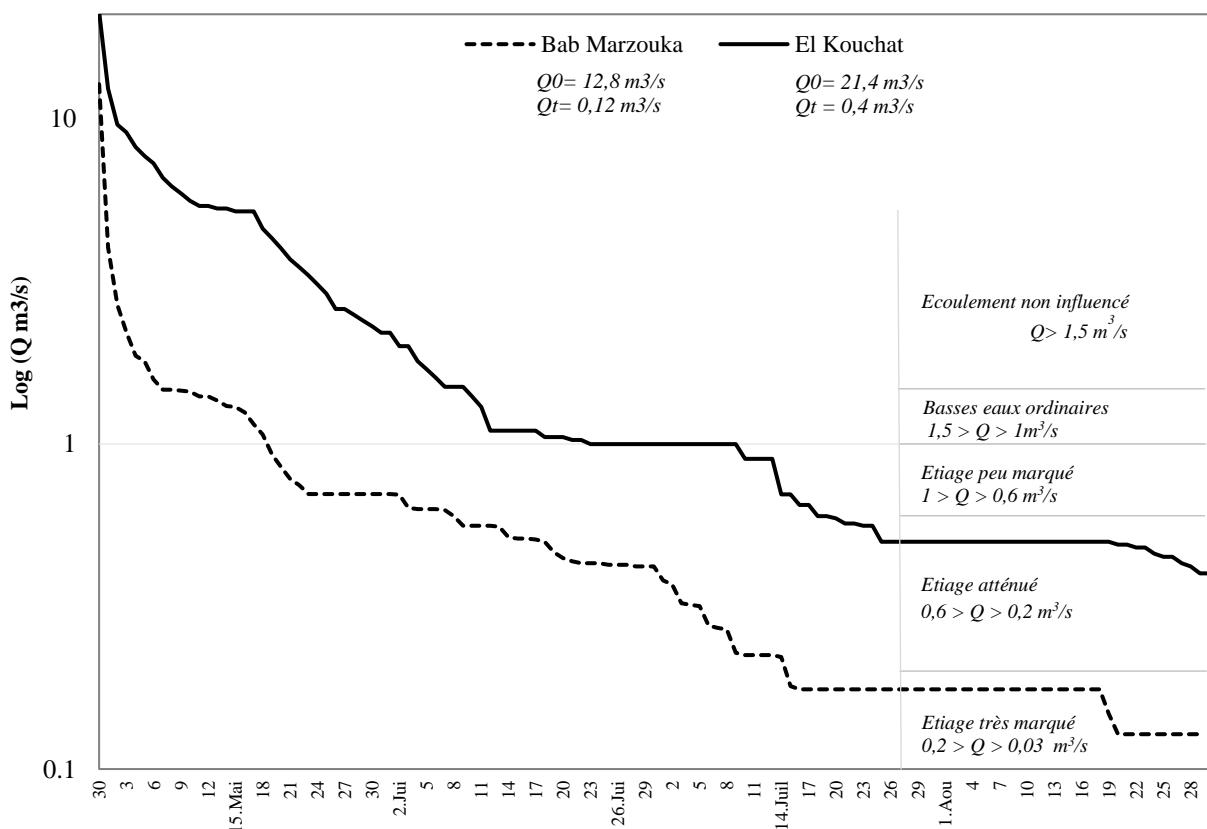


Figure 43 – Tarissement hydrologique de l'année de 1981 et types d'étiage

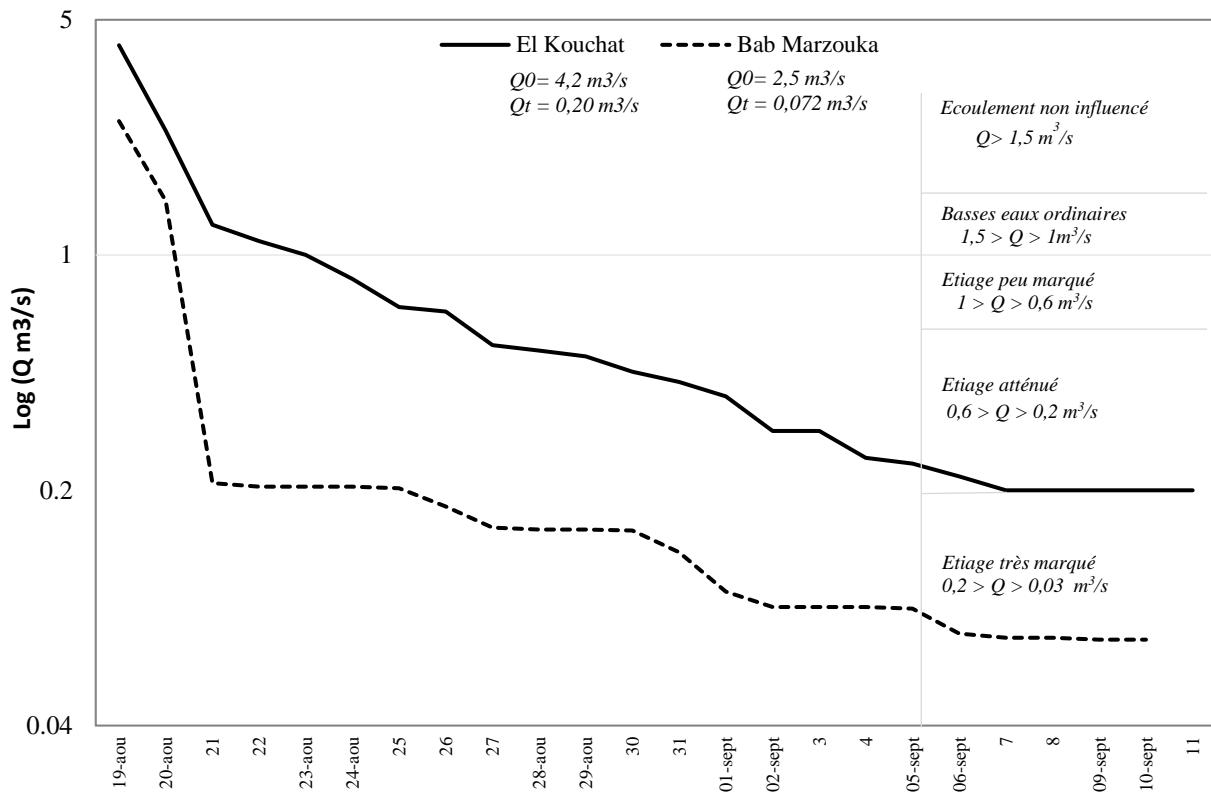


Figure 44 – Tarissement hydrologique de l’été de l’année de 1988 et types d’étéage

2-2-2- Comparaison des tarissements obtenus par les différentes méthodes d’extraction

Pour comparer les différentes méthodes d’extraction des périodes de tarissement on va toujours se contenter des données des deux années hydrologiques précédemment traitées (1981-82 et 1987-88). Les résultats obtenus sont complètement différents en raison de la dissimilitude des critères retenus par chacun lors de l’extraction.

Tableau 36 – Tarissement de 1980-81 et ses propriétés en fonction des méthodes d’extraction

Propriétés	Courbe des débits décroissants		Courbe enveloppes		Courbes séquences	
	Bab Marzouka	El Kouchat	Bab Marzouka	El Kouchat	Bab Marzouka	El Kouchat
Durée de tarissement	122	123	20	13	63	63
Débit initial (m^3/s)	12,8	21,4	2,36	10	0,67	1
Débit de fin de tarissement (m^3/s)	0,128	0,4	0,128	0,362	0,13	0,36
Débit moyen de tarissement (m^3/s)	0,654	2,09	0,74	2,6	0,21	0,50
Coefficient Tarissement	0,037	0,032	0,146	0,255	0,03	0,02
Coefficient Vidange (V)	3,63%	3,14%	13,6	22,5	2,6	1,6
Réservoirs emmagasinés ($R=m^3$)	346	668	16,2	39,2	25,5	62,0

Tableau 37 – Tarissement de 1987-88 et ses propriétés en fonction des méthodes d'extraction

Paramètres	Courbe des débits décroissants		Courbe enveloppes		Courbes séquences	
	Bab Marzouka	El Kouchat	Bab Marzouka	El Kouchat	Bab Marzouka	El Kouchat
Durée de tarissement	23	24	14	12	13	13
Débit initial (m^3/s)	2,5	4,2	2,1	6,8	3,2	1,62
Débit de fin de tarissement (m^3/s)	0,072	0,2	0,06	0,03	0,131	0,0655
Débit moyen de tarissement (m^3/s)	0,292	0,717	0,67	2,31	0,51	0,26
Coefficient Tarissement	0,15	0,13	0,25	0,45	0,25	0,25
Coefficient Vidange	14,2	11,8	22,4	36,3	21,9	21,9
Réservoirs emmagasinés ($R=m^3$)	16,23	33,3	8,3	15,0	13,1	6,6

On constate clairement que les méthodes d'extraction des tarissements donnent des résultats très différents surtout quand il s'agit de la comparaison du tarissement de la même année en question. D'ailleurs, on observe bien que la méthode de la courbe enveloppe offre des périodes assez proches dans la durée à l'échelle interannuelle mais cette méthode ne permet pas d'avoir des éléments fiables en ce qui concerne le rythme de vidange des réserves hydriques et leur quantification parce que la courbe ne représente pas une véritable décroissance continue mais juste des débits reconstitués.

La méthode de courbe séquence reste la plus fiable car elle se base sur des critères purement hydroclimatiques. Le volume des réservoirs emmagasinées obtenu par cette approche est beaucoup plus bas par rapport à celui de la méthode de la courbe des débits décroissants en raison du raccourcissement de la période de tarissement du fait de son interruption soudain par les averses.

Conclusion du chapitre

Les conditions climatiques contrôlent fortement la nature et la profondeur des étiages des cours d'eau. La pluviométrie annuelle reçue et sa répartition intra-annuelle déterminent les périodes d'apparition des étiages et leur durée. En effet, lors d'une succession des années mouillées les nappes souterraines se reconstituent bien et assurent alors le soutènement de

l'écoulement pendant la période saisonnière sèche, et par conséquent les étiages sont moins creux et moins fréquents comme c'était le cas de 1988.

Les différents critères d'étiage (QME, DCE EEA) confirment le durcissement des conditions hydrologiques de l'oued Inaouène en période de sécheresse. En effet, la sévérité des étiages est caractéristique omniprésente de tous les cours d'eau méditerranéens sauf dans les bassins versants à dominance karstique dont les apports aquifères soutiennent les débits de l'oued ce qui permet de maintenir les débits pendant la sécheresse.

L'analyse des étiages en période de tarissement des réserves est une approche intéressante en soi. A cette échelle on peut mieux caractériser le rythme et le type de décroissance de débits et par la suite la quantification des réserves en eau emmagasinées dans le bassin. En effet la phase de tarissement est un stade qui arrive après une phase de décrue où les débits sont en train de s'épuiser, au moment où les cours d'eau sont uniquement alimentés par la vidange des nappes aquifères. En revanche, les résultats obtenus varient énormément selon la méthode adoptée pour l'extraction de la période de tarissement, par exemple l'utilisation de la méthode des courbes enveloppes donnent des tarissements beaucoup plus courts par rapport à la méthode de la courbe séquences et celle de la courbe des débits décroissants.

D'après l'analyse de certains cas de tarissement de l'oued Inaouène, on a constaté qu'il y a une différence entre la décroissance qui se produit en amont et celle qui a lieu en aval. La vitesse de vidange des réserves varie aussi d'une année à l'autre selon les conditions climatiques. Lors des années humides les tarissements sont plus courts mais également le vidange est très lent du fait de l'intervention brutale des pluies.

Chapitre 6

Crues de l’Oued Inaouène : caractérisation et variation spatio-temporelles

Sommaire

Introduction

- 1- Débits maxima annuels et sévérité des crues de l’oued Inaouène**
- 2- Prédétermination des débits de pointe de crues de différentes périodes de retour**
 - 2-1- Estimation par l’analyse fréquentielle- *Gumbel***
 - 2-2- Estimation des débits de crues de fréquence rare par la méthode de GRADEX**
- 3- Etude de cas : Analyse des crues à l’aide des hydrogrammes**
 - 3-1- Méthode de décomposition des phases de tarissement**
 - 3-2- Hydrogramme d’une crue simple**
 - 3-3- Hydrogramme des crues composites**

Conclusion du chapitre

Introduction

Les cumuls importants des pluies que reçoit le bassin d’Inaouène pendant les périodes humides de l’année, favorisent le gonflement des débits de l’oued et l’apparition des crues. Pourtant, il est parfois difficile de faire la distinction entre les hautes eaux et les crues même si ces dernières sont globalement des évènements brefs et extrêmes. L’utilisation des méthodes de terrain pour le calcul des débits des crues reste l’approche la plus robuste à donner des estimations réelles mais elles demeurent loin de la portée en raison de l’absence du matériel et manque de temps.

C’est évident que la forme et mode de répartition des pluies contrôlent le type de crue et son allure sur l’hydrogramme. Les pluies régulières et continues donnent souvent des crues longues dont l’allure sur l’hydrogramme montrent une montée et une décroissance des débits assez régulières à l’inverse des hydrogrammes des crues brutales dont l’apparition se rétreignent particulièrement sur la saison automnale.

Dans cette section consacrée à l’étude des crues, on va caractériser les crues de l’oued Inaouène en passant par deux étapes :

D’abord, on va commencer à estimer les débits de l’oued Inaouène selon des périodes de retour, dans le but d’avoir des crues de différentes intensité et fréquence. Ceci est grâce à l’utilisation des méthodes statistiques surtout l’ajustement par la loi de Gumbel (loi des valeurs extrêmes) et à la méthode de GRADEX qui permet d’estimer les valeurs des crues rares et très rares.

Deuxièmement, on va caractériser les crues et ses différentes phases hydrologiques grâce à l’analyse des hydrogrammes des crues de l’oued Inaouène. Pour cela, on va prendre différentes situations hydroclimatiques afin de visualiser l’évolution progressive (ou brutale) des débits et les propriétés hydrologiques de chaque phase de crue à partir de la montée jusqu’à la décrue et tarissement.

1- Débits maximas annuels et sévérité des crues de l’oued Inaouène

En l’absence de seuils des crues définis par des mesures sur le terrain, l’appui sur les débits maximas annuels comme valeurs représentatives est fort recommandé. En effet, à chaque année les cours d’eau connaissent de nombreux gonflements de leur débit qui peuvent correspondre à des crues.

Le régime hydrologique de l’oued Inaouène présente des variations énormes d’une année à l’autre en termes des maximums journaliers enregistrés. Les valeurs peuvent varier de 10 m³/s

pour une année contre 900 m³/s pour une autre. En comparant les crues à l'échelle spatiale, on constate clairement une synchronisation entre les débits de deux stations de sorte que les crues qui s'enregistrent en aval aient lieu également en amont du bassin (Fig. 8)

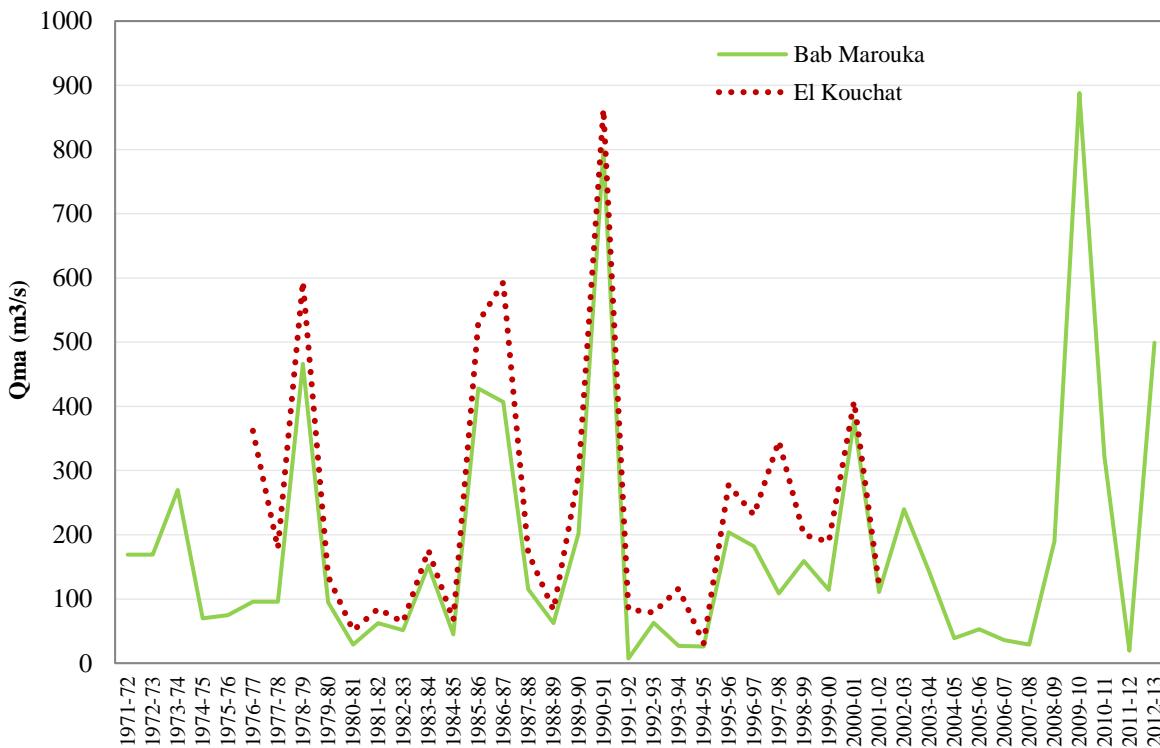


Figure 45 – Variations interannuelles des débits maximums annuels de l'oued Inaouène

Dans le but d'avoir des éléments comparables en termes de variabilité spatiale, on a opté pour l'indice de sévérité des crues (Is) de Mayer et Coutagne qui donnent des résultats pratiques dans les bassins versants dont la superficie est comprise entre 100 et 20 000 km². L'indice (Is) constitue un bon élément d'approche dans le cadre d'une analyse comparative des crues entre des bassins de tailles différentes. Il est formulé ainsi :

$$I = \frac{Q_{\max}}{\sqrt{S}}$$

où : Q_{max} : est le débit maximal de crue
S : est la surface du bassin versant

A partir de cet indice on constate que les crues enregistrées dans la haute vallée d'Inaouène (Bab Marzouka) sont globalement sévères par rapport à ce qui s'observe en station d'aval (El Kouchat). Les valeurs de l'indice Is pour l'oued Inaouène varient de 0,2 à 21. La plus extrême a eu lieu en 2010 et la plus faible dont la forme s'approche bien des hautes eaux ordinaires a été observé en 1992 (Fig. 9).

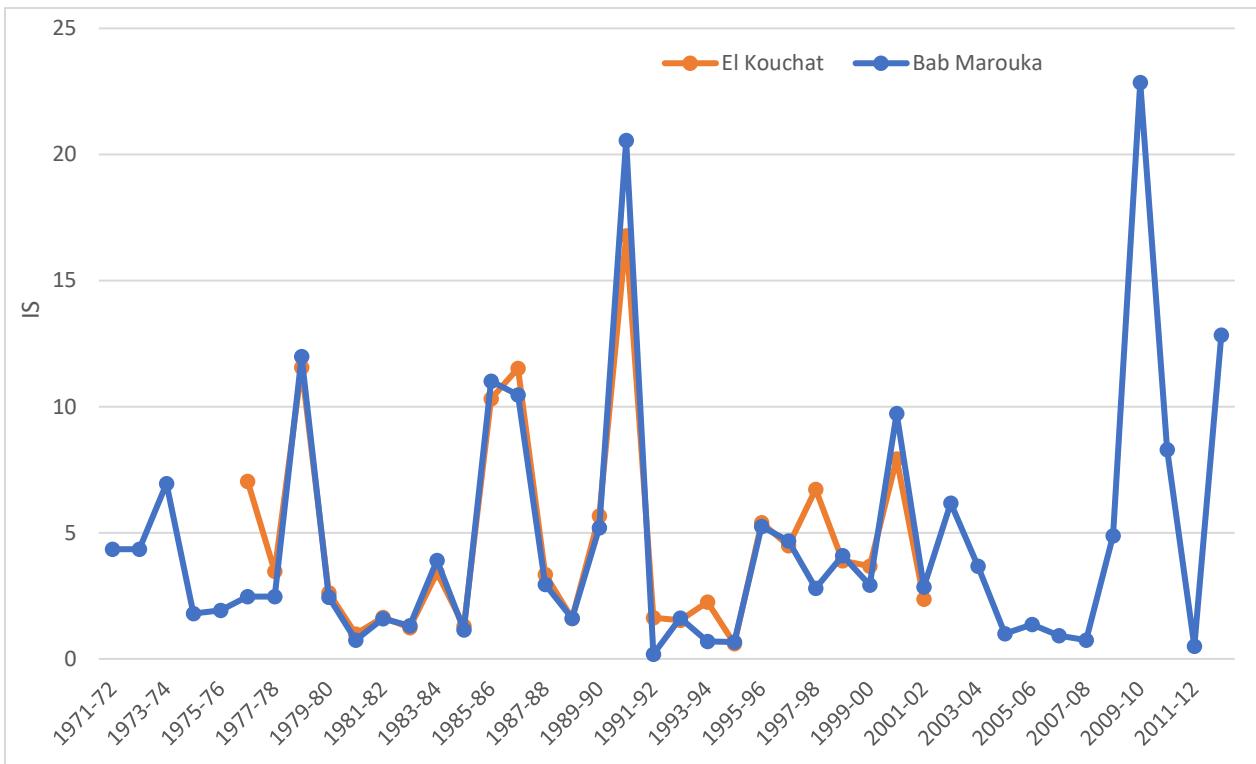


Figure 46 - Indice de sévérité des crues (Is) de l'oued Inaouène à partir des débits maxima annuels

2- Prédétermination des débits de pointe de crues de différentes périodes de retour

2-1- Estimation par l'analyse fréquentielle-Gumbel

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction, elle consiste à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre) afin d'en définir les probabilités d'apparition future (Meylan & Musy, 1999). Cette prédiction repose sur la détermination et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel, qui est une équation décrivant (modélisant) le comportement statistique d'un processus (P. Meylan & A. Musy, 1999, Hydrologie fréquentielle).

A la base, on traite la distribution statistique d'une série d'observation formée de débits maxima pour chaque année (valeur par an). Cette distribution est ensuite ajustée sur une des lois théoriques de probabilité (loi de Gauss, loi de Galton, loi de Gumbel, etc.).

Pour les débits extrêmes, en l'occurrence les débits maxima annuels, on utilise le plus souvent la loi de Gumbel (Roche 1963), qui est une loi à double exponentielle. Sa fonction de répartition $F(x)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp(-\exp(-\frac{x-a}{b}))$$

avec la variable réduite suivante : $u = \frac{x-a}{b}$

Avec a et b sont des paramètres du modèle de Gumbel, respectivement le paramètre de position et le paramètre de dispersion :

$$a = Q - (b \times \gamma)$$

$$b = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \sigma$$

avec :

Q = est la moyenne arithmétique de l'échantillon étudié

$\gamma = 0,5772$ (constante d'Euler)

σ = écart-type de la série statistique

Sur un papier diagramme à échelle de probabilité de Gumbel, on reporte les valeurs de fréquence expérimentale ($f = (\text{Rang} - 0,5) / n$) de toutes les années d'observation, puis on trace la droite d'ajustement. Mais à défaut du papier diagramme à échelle de Gumbel, on procède d'un changement de variable pour obtenir une échelle linéaire y sachant que $F(Q) = e^{-e^{-u}}$, par conséquent $u = -\text{Log}(-\text{Log} F(Q))$.

À première vue du graphique de Gumbel (Figure 10 et 11), l'ajustement paraît adéquat, malgré le fait qu'il y a parfois un léger décalage entre la droite d'estimation théorique et les débits, surtout ceux supérieurs à 600 m³/s. La lecture de ce graphique a permis de dégager les valeurs de quantiles, les probabilités d'occurrence, et les périodes de retour des crues particulières (Tableau 10).

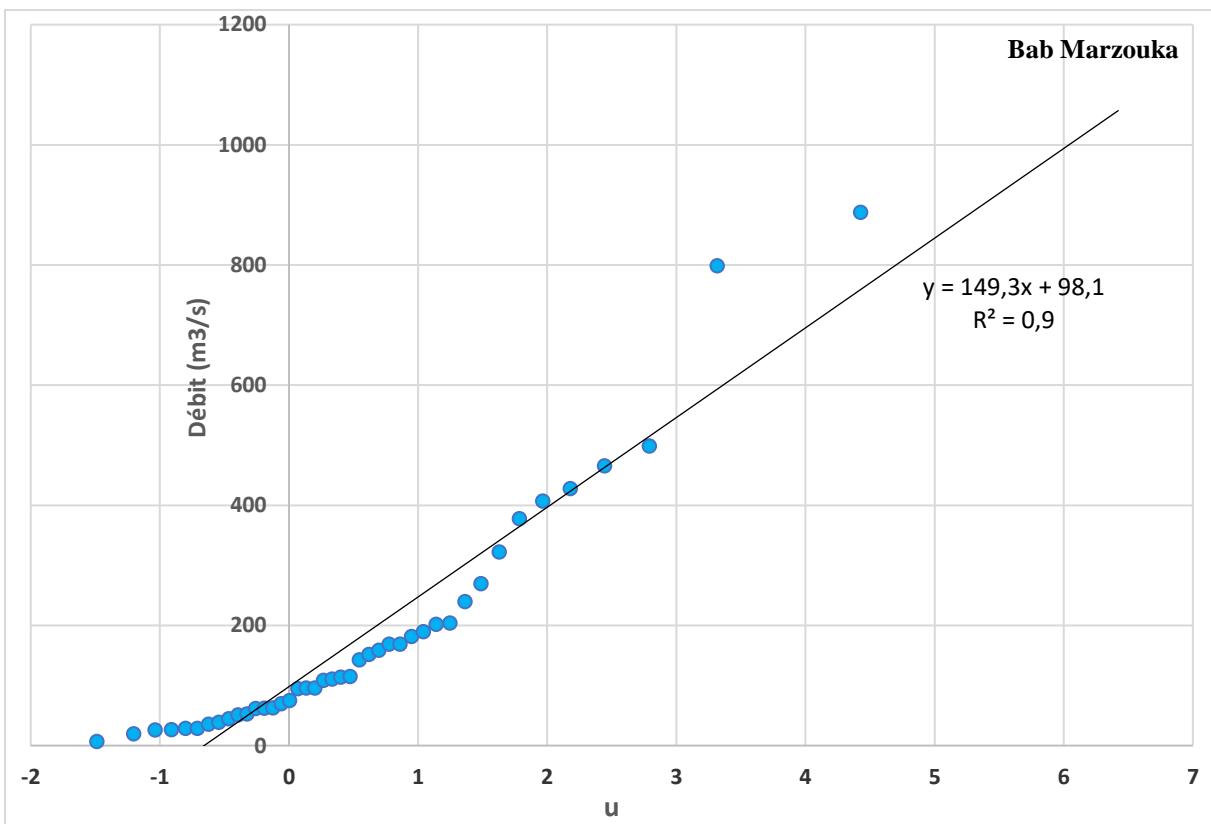


Figure 47 – Ajustement des débits maximums journaliers de la station de Bab Marzouka à de la loi de Gumbel

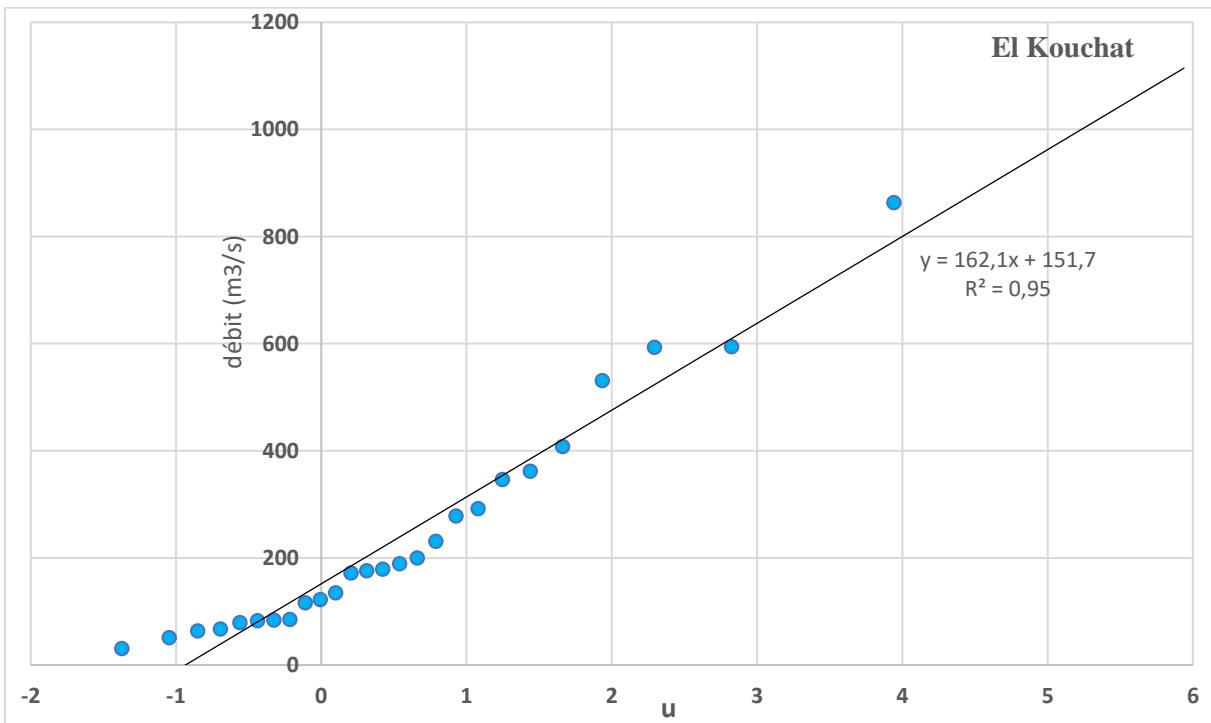


Figure 48 – Ajustement des débits maximums journaliers de la station d'El Kouchat à de la loi de Gumbel

Tableau 38 – Estimation des débits de crue de l’Oued Inaouène pour différentes périodes de retour

Quantiles	Période de retour	Probabilité au non-dépassement	Variable u de Gumbel	Débit (m ³ /s)	
				Bab Marzouka	El Kouchat
Crue quinquennale	5	0,8	1,5	322	395
Crue décennale	10	0,9	2,3	434	516
Crue cinquantenaire	50	0,98	3,9	680	784
Crue centennale	100	0,99	4,6	785	897

2-2- Estimation des débits de crues de fréquence rare par la méthode de GRADEX

La méthode du GRADEX a été conçue, mise au point, testée et validée par le groupe de recherche d’EDF (Electricité De France) (Guillot and Duband, 1967). Elle a pour but de rechercher les débits maximaux de crues pour des fréquences d’apparition rares à très rares (temps de retour de plus de 100 ans). En effet, les crues rares constituent une véritable menace pour les grands ouvrages hydrauliques (barrages) et les infrastructures.

Au contraire des autres méthodes de prédétermination des crues basées sur le traitement statistique des seules valeurs des débits observés, la méthode de GRADEX intègre également l’information pluviométrique pour calculer le ruissellement. En revanche, son application implique plusieurs contraintes comme la similarité de la durée et de l’unité de mesure des pluies considérées avec celles des débits (par mm en 24 h).

L’application de la méthode de GRADEX (GRAdient d’une Distribution Exponentielle) consiste à un certain nombre d’étapes :

Etape 1 : Ajustement des précipitations maximales journalières annuelles selon une distribution de Gumbel,

Etape 2 : Ajustement des débits moyens journaliers maximaux annuels selon une distribution de Gumbel. Ceci est après le fait d’avoir transformé les [m³/s] en [mm/24h].

Etape 2 : Déterminer les débits moyens maximaux de temps de retour X ans en appliquant la méthode du GRADEX et en utilisant le débit décennal comme point pivot.

L’ajustement des précipitations maximales journalières (série de 43 ans) selon la loi de Gumbel semble très pertinent d’où l’on observe une distribution très proche des pluies

observées autour de la droite d'ajustement. Grace à la pente (b) de cette droite on peut tracer ultérieurement la droite de GRADEX afin d'extraire les débits de pointe des crues rares.

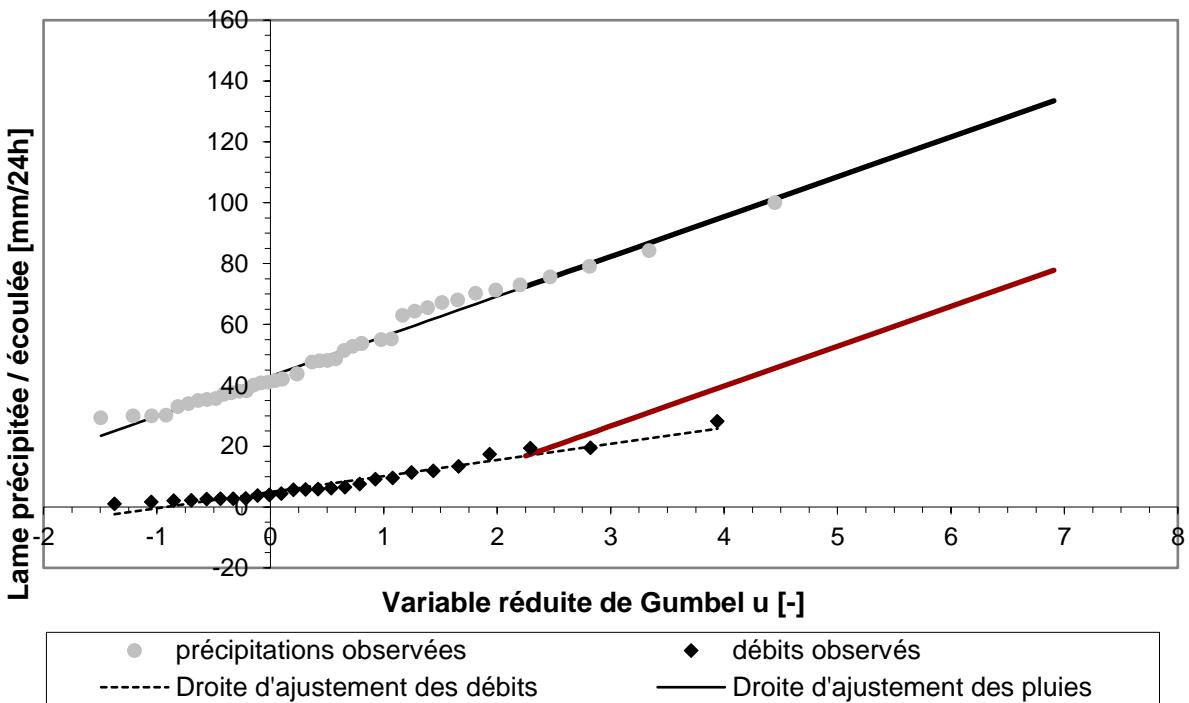


Figure 49 - Ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits de la station d'El Kouchat

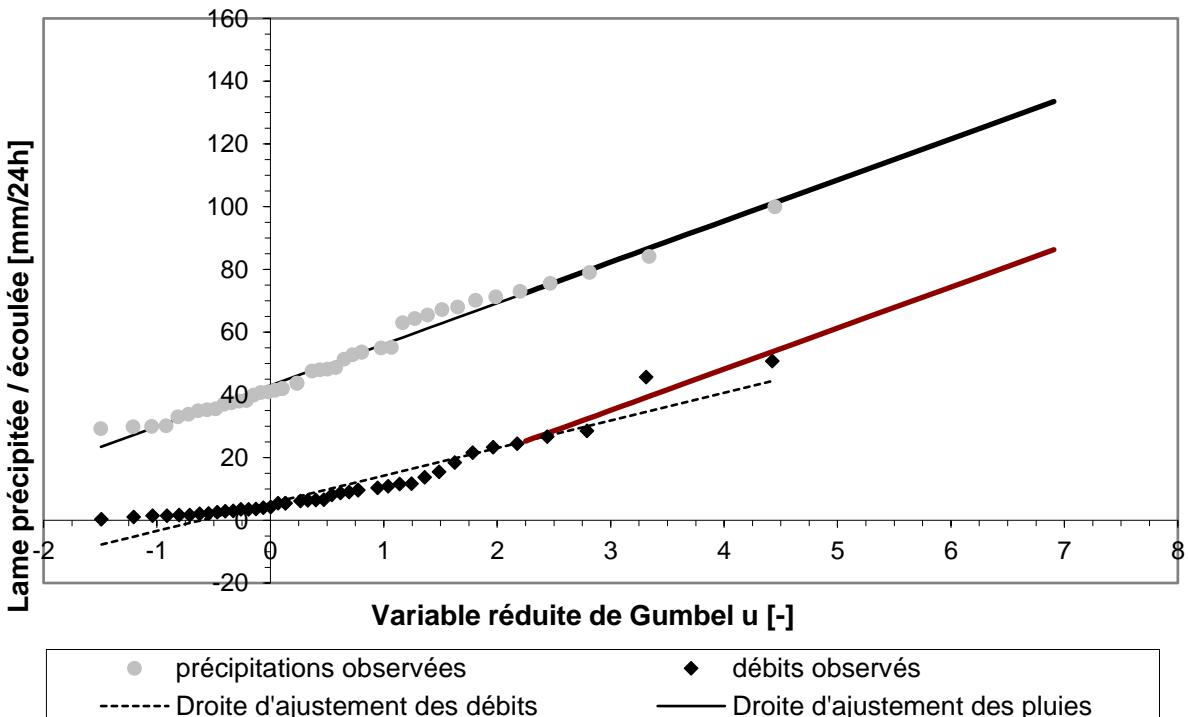


Figure 50 - Ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits de la station de Bab Marzouka

L'ajustement des débits maxima par la loi de Gumbel donnent des résultats satisfaisants surtout pour des débits de période de retour égale ou inférieure à la durée d'observation, mais au-delà l'appui sur la méthode statistique reste abusif.

L'application de la méthode de GRADEX sur les débits maxima journaliers annuels a permis de savoir les débits de pointe des crues rares et très rares des deux stations de l'oued Inaouène. Quatre périodes de retour ont été retenues afin d'en déduire les crues, respectivement les crues de T50, T100, T5000 et T1000. Ces quatre crues varient entre 1177 m³/s et 2384 m³/s à la station d'El Kouchat et entre 819 et 1508 m³/s à la station d'amont.

Les crues millénaires sont souvent bien prises en considération lors de la construction des grands ouvrages hydrauliques vu sa grande puissance hydrocinétique dévastatrice. De plus, les changements morphologiques majeurs des plaines alluviales se font essentiellement lors de ces évènements rares.

Tableau 39 – Débits de pointe extrapolés pour la station d'El Kouchat par la méthode de GRADEX

T [ans]	F(x) Hazen [-]	Variable u de Gumbel [-]	QT estimés ([mm/24])	QT estimés [m ³ /s]
50	0,980	3,90	38,4	1177
100	0,99	4,60	47,6	1458
500	0,998	6,21	68,7	2106
1000	0,999	6,91	77,8	2384

Tableau 40 – Débits de pointe extrapolés pour la station de Bab Marzouka par la méthode de GRADEX

T [ans]	F(x) Hazen [-]	Variable u de Gumbel [-]	QT estimés ([mm/24])	QT estimés [m ³ /s]
50	0,980	3,90	46,9	819
100	0,99	4,60	56,0	979
500	0,998	6,21	77,2	1349
1000	0,999	6,91	86,3	1508

3- Etude de cas : Analyse des crues à l'aide des hydrogrammes

Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une analyse fine des crues à l'échelle instantanée (horaire). Cette étude a pour objectif de caractériser les différents types de crues de l'oued Inaouène à partir d'un hydrogramme standard où $Q = f(t)$. Cette analyse permet de définir les différentes phases d'écoulement au cours d'un évènement de crue dès la montée des eaux jusqu'à leur tarissement.

Il faut noter qu'il nous est impossible de prendre en compte l'effet de l'échelle spatiale sur les propriétés de la crue entre la station amont du bassin et celle d'aval en raison de l'indisponibilité des relevés hydrologiques synchroniques pour les deux, voire leur absence (station de Bab Marzouka). C'est pourquoi, on a choisi de faire un traitement indépendant des épisodes de crue pour chaque station hydrologique.

3-1- Méthode de décomposition des phases de tarissement

Concernant la méthodologie de décomposition des crues on a opté pour une méthode empirique qui consiste à appliquer certains indices hydrologiques comme l'estimation du temps de concentration des eaux et le temps de début de montée de crue. Parallèlement à ceci, on a adopté une méthode purement graphique (celle de MONIOD F. 1969) pour séparer les écoulements de décrue de ceux de tarissement.

▪ *Phase de montée*

Afin de savoir le temps de début de cette phase à partir de l'hydrogramme, on a appliqué la relation suivante :

$$Td = Tr - Tc$$

Td : temps de début de montée à partir du premier point de l'hydrogramme,

Tr : temps de réponse théorique, considéré comme la durée allant du premier point (T0) jusqu'au pic de l'hydrogramme,

Tc : temps de concentration des eaux. La formule utilisée là c'est celle de KIRPICH. Au niveau du site de Bab Marzouka le Tc est de l'ordre de 8 heures alors qu'à Bab Marzouka il est de 25 heures.

▪ *Séparation de la phase de décrue de celle de tarissement*

En effet, la courbe de décroissance d'un hydrogramme de crue regroupe à la fois une phase dite de décrue et une autre de tarissement. Afin de pouvoir séparer ces deux stades consécutifs on peut s'appuyer sur la méthode de MONIOD qui se base sur une approche purement graphique. Elle consiste à tracer la courbe exponentielle de décroissance de décrue et la courbe de récession ($Q_0 \times \text{Exp}(-t \times \alpha)$). L'intersection de ces deux courbes donne le point de fin de décrue et début de tarissement des eaux.

α : coefficient de décroissance ; Q_0 : débit initial de la courbe décroissance ; t : temps.

3-2- Hydrogramme d'une crue simple

Il s'agit là de la crue de 16 novembre 1993 qui a été observée à la station d'El Kouchat. C'est une crue simple est caractérisée par une seule pointe de crue qui s'est produite vers 7h avec un débit de pointe de l'ordre de 280 m³/s.

La situation météorologique a été marquée par des conditions climatiques instables, liées particulièrement de l'existence des averses localisées sous forme de cellules cycloniques locales au-dessus des zones montagneuses du Rif et du Moyen-Atlas. Le cumul des précipitations entre 15 et 16 novembre était de l'ordre de 26 mm à la station de Taza et 29 mm à la station de Bab Marzouka (Fig. 13-14) bien que cette continuité puisse être plus haute dans les zones montagneuses.

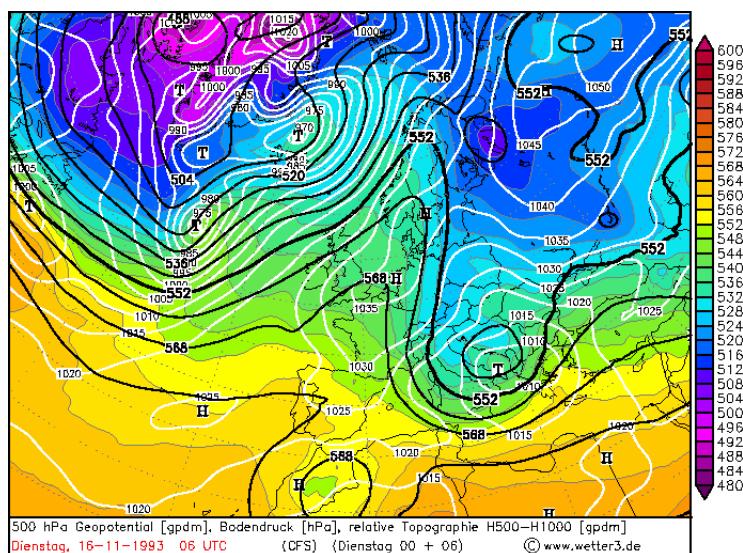


Figure 51 – Carte météorologique de 500 hPa Géopotentiel du 16 novembre 1993(à 6h UTC)

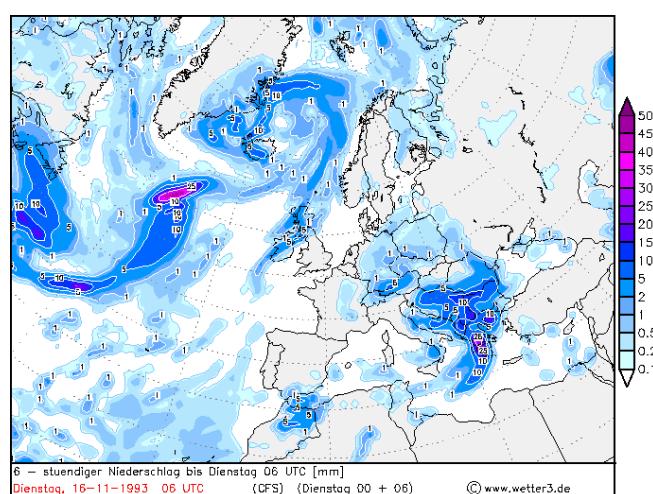


Figure 52 – Carte météorologique de la pluviométrie probable à 6h UTC du 16 novembre 1993

La crue a commencé le 14 novembre à 12 heures par un début de base de 1,4 m³/s, et au bout de 19h le volume traversant le lit a haussé de manière exponentielle pour atteindre un pic de 280 m³/s. La décomposition de l'hydrogramme de crue permet d'en sortir les trois phases suivantes :

- *Phase de montée* : qui correspond à la période d'augmentation rapide du débit. Pour cette crue, cette phase a duré 25 heures et commence par un débit de 2 m³/s. Le début de montée de crue a eu lieu le 15 novembre à 08h avec un débit de 2 m³/s et au bout de 25 heures la montée des débits est à son maximum.
- *Phase de décrue* : correspond à la phase de décroissance lente des écoulements, où le débit a passé de 280 m³/s pour atteindre dans 9 heures un volume de 35,5 m³/s soit une diminution de 27,2m³/h.
- *Phase de tarissement* : elle a duré environ un jour et plus, et il s'agit de la phase d'épuisement des réserves souterraines. En effet, après l'arrêt des pluies les nappes souterraines continuent à alimenter et à soutenir longtemps les débits des cours d'eau. Le tarissement suivant cette crue s'avère assez soutenu, il a commencé par un débit assez important (35 m³/s) et finit par rejoindre un flot de base de 7 m³/s.

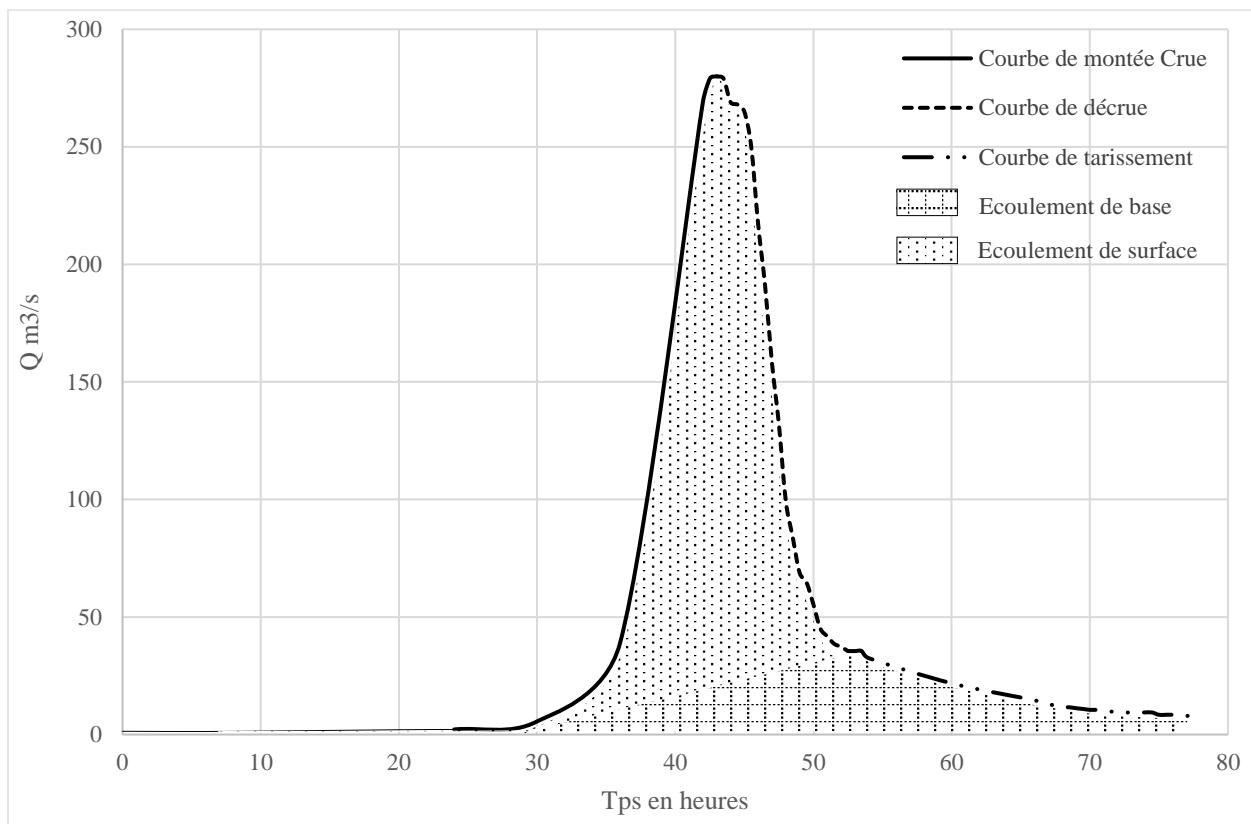


Figure 53 – Décomposition des phases de la crue de 16 novembre 1993 enregistrée à la station d'El Kouchat

Tableau 41 – Caractéristiques hydrologiques associées à la crue de 16 novembre 1993

Dates	Début de la crue Début de la montée de crue Pointe de la crue Début de tarissement Fin de la crue	14/11 à 18h 15/11 à 08h 16/11 à 07h 16/11 à 16h 17/11 à 18h
Durée	Durée totale de la crue Durée de la décrue Temps de montée Durée de tarissement	2 heures 30 min 9h 25h 1j et 1h:30
Débits (m³/s)	Débit de base au début de la crue Débit de base à la fin de la crue Débit de base moyen Débit de pointe de crue Débit moyen de la crue	1,4 35,5 12,3 280 137,6
Coefficients calculés	Coefficient d'asymétrie Coefficient d'immodération Puissance de la crue	0,3 137 5,4

3-3- Hydrogramme des crues composites

À la suite de l'exploration de la base de données à disposition, il s'avère que la crue de 9 mars 2010 est la plus représentative d'un gonflement fluvial à double pic successif. Cette crue a été observée au niveau de la station de Bab Marzouka et elle peut être considérée comme la plus dévastatrice au cours de dernière cinquante d'années. La première phase de cette crue est complètement différente que ce soit au niveau de la puissance ou la durée.

Le cumul pluviométrique enregistré ce jour-là était exceptionnel, environ plus de 45 mm de pluies qui a été observé à la station de Bab Marzouka. Cette situation météorologique est liée une circulation méridienne due à l'affaiblissement des contrastes et des gradients thermiques et de pression entre les latitudes subtropicales et les latitudes tempérées, accompagnée d'un déplacement longitudinal des perturbations du nord vers le sud. Cette circulation a produit un temps perturbé au Maroc, où le pays était surmonté par des coulées d'air froid subpolaire rendant l'atmosphère instable (Fig. 16 et 17).

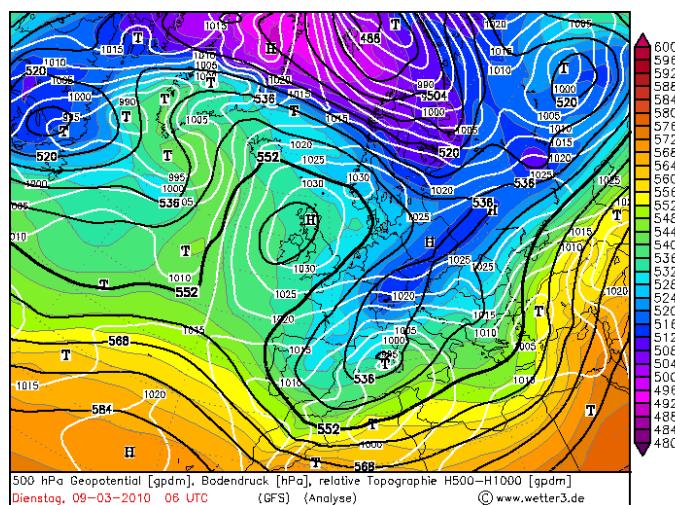


Figure 54 – Carte météorologique de 500 hPa Géopotentiel du de 9 mars 2010 (à 6h UTC)

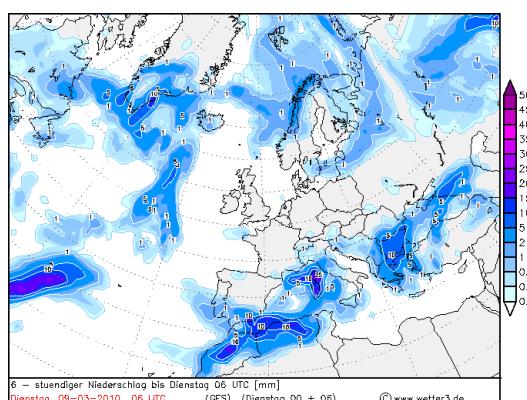


Figure 55 – Carte météorologique de la pluviométrie probable à 6h UTC du de 9 mars 2010

Cette crue est encadrée par deux minimums (77 et 111 m³/s) correspondant au débit de base initial de crue et de fin de décrue. En fait, il s'agit d'un débit assez soutenu qui doit son abondance aux pluies enregistrés lors des jours précédents qui ont pu recharger les nappes et les réserves du sol. La décomposition de l'hydrogramme de cette crue permet de relever les phases suivantes :

- *Phase de montée* : là il y a une double montée des eaux vu le fait qu'il s'agit bien d'une crue composite. La durée de la montée de la crue lors du premier pic n'est très loin de celle du deuxième (respectivement 9 h et 7h),
- *Phase de décrue* : est beaucoup plus longue que celle de montée lors de la deuxième phase de crue, alors qu'en première est courte en raison de son interruption par une remontée soudaine des eaux par un apport pluvial. Cette dissymétrie peut être expliquée par la continuité de l'alimentation du cours d'eau d'Inaouène par les pluies.
- *Phase de tarissement* : en enregistrant une valeur de 111 m³/s le système hydrologique de l'oued rentre dans une phase de vidange des eaux exceptionnellement brève (17 heures) en raison de son interruption par les pluies. Le débit à la fin de tarissement était de l'ordre de 93,2 m³/s, ce qui correspond à un coefficient de tarissement de 0,01 m³/h. En faisant le rapport du débit initial du tarissement et la valeur de ce coefficient on peut déduire le volume des réservoirs hydrologiques emmagasinés, qui est de l'ordre de 10168 m³.

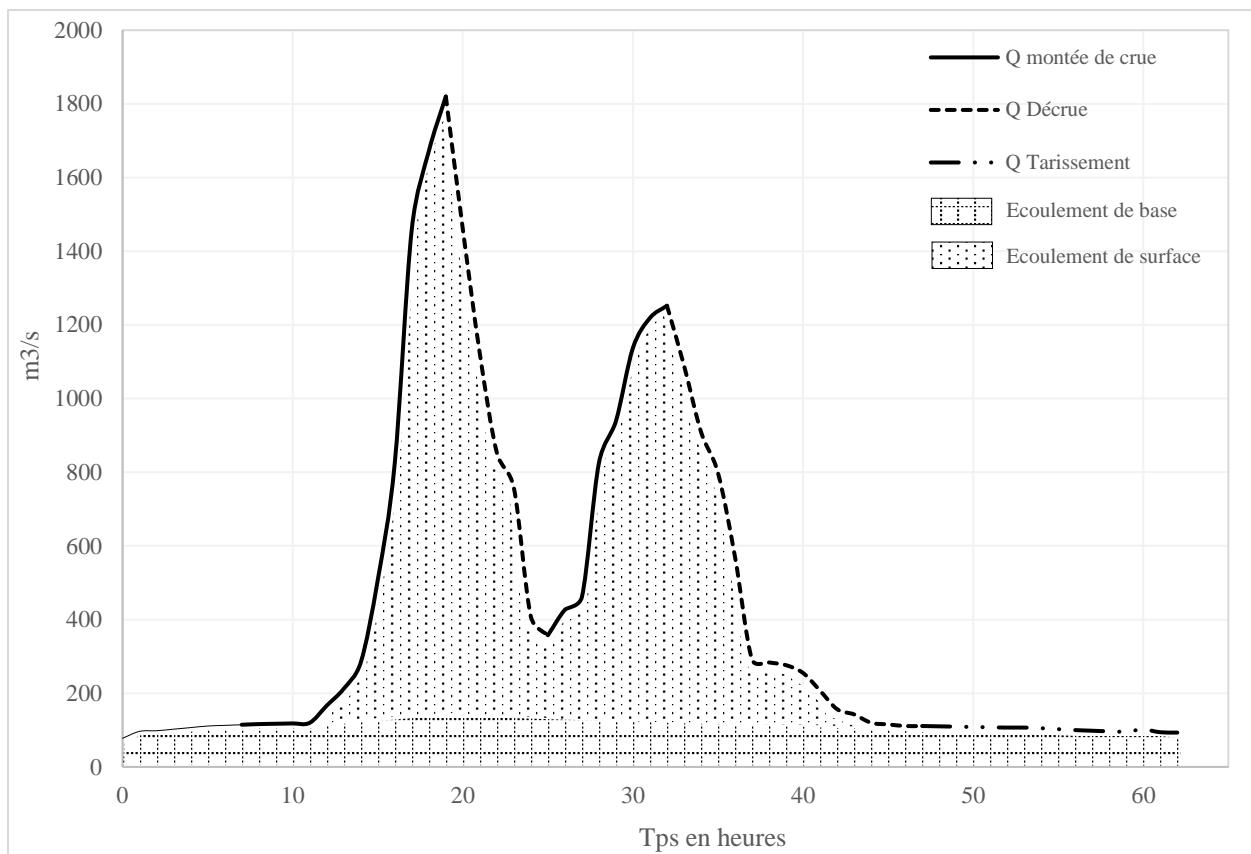


Figure 56 – Décomposition des phases de la crue de 9 mars 2010 enregistrée à la station de Bab Marzouka

Tableau 42 – Caractéristiques hydrologiques associées à la crue de 9 mars 2010

Paramètres de la crue		Phase 1	Phase 2
Dates	Début de la montée de crue	08/03 à 20h	09/03 à 10h
	Fin de la décrue	09/03 à 10h	10/03 à 7h
	Pointe de la crue	09/03 à 4h	09/03 à 17h
Durée	Durée totale de la crue	26 heures	22 heures
	Durée de la décrue	6 heures	14 heures
	Temps de montée de crue	9 heures	7 heures
Débits (m³/s)	Débit de base au début de la crue	77,8	
	Débit de base à la fin de la crue	111	
	Débit de base moyen	104,3	
	Débit maximum ruisselé	1820	1252
	Débit moyen de la crue	513	543
Coefficients calculés	Coefficient d'asymétrie	1,2	0,58
	Coefficient d'immodération	23	11
	Puissance de la crue	46,8	32,2

Conclusion du chapitre

Parallèlement aux étiages, les crues d’Inaouène sont également sévères et extrêmes mais cette fois-ci elles sont brutales et brèves. Ceci corrobore l’extrémité du régime hydrologique de l’oued Inaouène.

L’utilisation de la méthode statistique et l’ajustement par la loi de Gumbel a permis de déterminer des crues de périodes retour allant de 2 ans jusqu’aux crues centennales. Pourtant, la fiabilité de cette méthode s’arrête pour des crues de périodes de retour égales ou inférieures à la période totale d’observation. Au-delà de cette marge le recours à la méthode de GRADEX est fortement recommandé en raison de sa capacité de prédéterminer des crues de fréquence très rares allant jusqu’à 1000 ans parce qu’elle d’incorporer des données pluviométriques et les débits tout en appliquant une loi exponentielle de valeurs extrêmes. En effet, les crues rares estimées par la méthode statistique sont médiocres et en réalité on les voit se reproduire chaque année, à l’inverse de la méthode de GRADEX dont les débits estimés sont véritablement exceptionnels.

A l’échelle spatiale, on a constaté à partir de l’indice de sévérité des crues que les inondations observées en haute vallée du bassin sont plus puissantes par rapport à celles qui se produisent en aval bien que les volumes enregistrées soient plus grands.

Enfin, l’analyse des hydrogrammes des crues a montré une grande dissymétrie entre les différentes phases de crues voire leur changement entre une crue à l’autre. Ceci revient aux propriétés hydroclimatiques des crues en question. En effet, les crues automnales sont souvent rapides et brèves et dont le tarissement dure assez longtemps, et vice-versa à ce qui se passe en hiver et printemps.

Conclusion de la Troisième Partie

L'étude des situations extrêmes de l'écoulement de l'oued Inaouène constitue une étape primordiale pour une compréhension complète du régime hydrologique de chaque bassin versant. Il s'agit là de deux événements hydrologiques qui se produisent annuellement et à plusieurs reprises dans l'année, que ce soit de façon continue et progressive (étiages) ou soit de manière instantanée et brève (crues). Ces deux phénomènes ne sont qu'une réponse directe à des conditions climatiques plus ou moins humides ou sèches.

D'après l'étude et l'analyse des crues et étiages de l'oued Inaouène on constate qu'ils sont caractérisés par leur extrémité et forte récurrence. Ceci corrobore l'immodération du régime hydrologique du bassin d'Inaouène, une caractéristique partout dans les zones méditerranéennes. En effet, en analysant les conditions climatiques du bassin d'Inaouène on observe clairement l'hétérogénéité, sur les différentes échelles temporelles, de la répartition de la pluviométrie. Ceci impacte directement sur les conditions hydrologiques et hydrogéologiques du bassin et de son réseau hydrographique.

En ce qui concerne les crues d'Inaouène on a bien observé leur caractère bref, brutal et extrême. Ces événements liés à un grand apport pluvial, évoluent spatialement de façon ordinaire, c-à-d. leurs volumes augmentent de l'amont vers l'aval en raison de la concentration des apports pluviaux en amont du bassin. En revanche, les crues enregistrées en amont (Bab Marzouka) sont plus puissantes par rapport à celles observées en aval. Ceci peut s'expliquer par la pente moyenne du bassin et celle du cours d'eau principal. Ces deux paramètres s'affaiblissent énormément dans la basse vallée d'Inaouène (secteur d'El Kouchat).

L'estimation des crues par l'ajustement statistique à la loi de Gumbel et complémentée par la méthode de GRADEX pour les valeurs très rares, a permis de bien prédire les différentes valeurs de crues en fonction de différentes périodes de retour. D'ailleurs, l'analyse morphologique des crues à l'aide des hydrogrammes nous a montré les différents stades d'évolution d'une crue à partir du débit de base initial jusqu'à la fin de la courbe de décroissance des débits. Pour cela on a pris deux différents cas, une crue simple et un autre composite, les résultats et les phases qui en résultent sont complètement différents.

Concernant les étiages, on a bien constaté leur profondeur et longévité. En effet, les étiages sont des phénomènes omniprésents dans le régime de l'oued Inaouène, ils se produisent assez fréquemment le long de l'année. Pourtant, il faut noter que les étiages qui se produisent en hiver

et en début de printemps, bien qu'ils soient profonds, sont généralement de courte durée. En revanche, à partir du mois de mai jusqu'à septembre ces événements s'étalent de façon continue et ils ne s'interrompent que rarement.

Contrairement à la variation spatiale des crues où l'on a observé qu'elles sont plus puissantes en amont qu'en aval, les étiages constatés à la station d'El Kouchat sont moins sévères que ceux enregistrés en amont en raison des apports souterrains provenant du plateau de Tahla du côté du Moyen-Atlas qui alimentent les débits et aussi de l'effet de la surface, bien que cette hypothèse semble très loin du simple fait que les débits spécifiques d'étiages observés à la station de Bab Marzouka sont plus maigres que ceux de la station d'El Kouchat .

CONCLUSION GENERALE

Cette présente étude nous a mené à constater les principaux traits de l'hydrologie de l'oued Inaouène leur forte liaison aux propriétés physiographiques de son bassin versant. Le régime hydrologique et ses différentes situations sont très variables en temps et en espace. La forte variabilité temporelle et les grandes amplitudes entre les maximas et les minimas sont deux éléments suffisants pour décrire la caractéristique du fonctionnement hydrologique de cet oued.

A partir l'étude hydrologique de l'oued Inaouène et son bassin-versant on a pu ressortir plusieurs constatations concernant le fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène et le rôle de son complexe physique et humain :

En ce que concerne le milieu physique du bassin et le rôle de l'intervention humaine, on peut conclure qu'ils sont à l'origine du mode de fonctionnement de l'oued Inaouène. Le climat est généralement irrégulier et caractérisé par une double variabilité intra et interannuelle qui réagit directement sur la variabilité des débits des cours d'eau et qu'il est à l'origine de la nature excessive du régime de l'oued. La topographie et surtout le système des pentes et l'hypsométrie créent des variations spatiales au niveau de la lame d'eau précipitée et de la vitesse des écoulements. Le couvert végétal permanent est très localisé (Chaîne du Moyen-atlas et Jbel Taïnaste), pourtant il contribue fortement à la régularisation de l'écoulement superficiel. La lithologie du bassin peut être scindée en une unité imperméable et tendre répartie dans le Prerif, et favorisant l'écoulement de surface, et en une unité perméable et résistante étendue notamment dans le Moyen-atlas. Au niveau de ce dernier une grande étendue de la nappe souterraine s'étalent surtout au niveau des structures pliées et tabulaires et qui favorise à l'atténuation des étiages de l'oued Inaouène pendant la période de sécheresse. Pour ce qui concerne le milieu humain, le bassin du Haut Inaouène est relativement peuplé avec des différences spatiales au niveau des concentrations humaines. Les interventions anthropiques dans le bassin versant d'Inaouène sont multiples et peuvent affecter l'écoulement de façon directe ou indirecte. L'urbanisation accroissant dans les communes urbaines comme Taza constituent des plateformes favorables au ruissellement de surface et l'alimentation des cours d'eau en eau usée, comme le cas de la ville de Taza dont les effluents débouchent à l'oued Larbaa, ce qui affecte le régime naturel du tarissement en période de sécheresse. A côté, il y a des effets des barrages hydrauliques comme le barrage de Bab Louta établi sur l'oued Bousbaâ qui affecte la quantité d'eau arrivant au cours d'Inaouène.

Concernant l'étude du bilan hydrologique du bassin-versant de l'oued Inaouène on constate toujours la saisonnalité et l'individualisation deux périodes distinctes : un été hydrologique allant de mai à octobre, et un hiver hydrologique allongé sur les autres mois. Pendant la première phase le déficit d'écoulement est fort, l'ETP est exponentielle et les réserves en eau sont en plein épuisement. En revanche, lors de l'hiver hydrologique les réserves en eau se reconstituent et les lames écoulées à l'exutoire sont de plus en plus importantes. Cependant, à l'échelle globale annuelle, le bilan hydrologique moyen est négatif ce qui signifie que les périodes d'indigence hydrologique sont plus importantes au cours de l'année.

S'agissant de l'analyse du régime hydrologique de l'oued Inaouène et son fonctionnement temporel on remarque clairement dessus les traits du régime méditerranéen, notamment la double irrégularité : intra et interannuelle. L'étude du régime annuel, mensuel, journalier, montre une grande différence d'une année à une autre. A l'échelle journalière, les débits varient significativement selon la nature de l'année (sèche, humide, moyenne). Cependant, la caractéristique très répandue est la fréquence des basses eaux qui s'interrompent de temps en temps par des valeurs supérieures isolées. Au niveau mensuel, il arrive que le régime hydrologique de l'oued Inaouène est marqué par deux saisons, la première est humide et englobe les mois de décembre, janvier, février, mars et avril, où l'abondance hydrologique est importante avec des moyennes assez fortes, tandis que la deuxième saison se distingue par une forte indigence hydrologique, voire des étiages creux ($0 \text{ m}^3/\text{s}$). Notons également que cette saisonnalité hydrologique et ses périodes d'apparition sont assez fluctuantes. Au niveau interannuel, les débits annuels varient considérablement d'une année à l'autre, où il existe une succession de périodes d'abondance hydrologique et d'autres sèches conformément à une indigence potamologique.

L'évolution des débits varient tant à l'échelle spatiale (entre stations) que temporelle. Les débits bruts augmentent longitudinalement vers l'aval de sorte que les valeurs observées en station d'aval (El Kouchat) soient supérieures à celles enregistrées en amont et l'inverse se passe pour l'évolution des débits spécifiques. Ceci peut s'expliquer tout simplement par l'effet de l'aire réceptrice qui s'accroît en allant vers l'aval, et aussi par le fait de la concentration des apports pluviaux et fluviaux dans les zones montagneuses en amont du bassin.

Les crues et étiages constituent deux traits essentiels dans l'hydrologie de l'oued Inaouène. Les étiages de l'oued sont très creux et surgissent le plus souvent dès la fin du printemps jusqu'au début de l'automne. Leur apparition est progressive dans la section aval du

bassin mais ils surgissent brutalement dans la partie amont. Ceci peut se traduire par le changement longitudinal de la réponse hydrologique. En aval, le temps d'acheminement des eaux est plus grand qu'en amont ainsi que la forme du bassin devient plus allongée ce qui fait que la réponse hydrologique soit plus rapide, de sorte qu'une fois les pluies s'arrêtent les débits eux-mêmes baissent plus ou moins proportionnellement. Les débits caractéristiques d'étiages varient de 0 à 2 m³/s, donc ils sont suffisants pour exprimer la pénurie d'eau que l'Oued Inaouène se vit pendant la saison sèche.

Quant aux crues de l'oued, on remarque clairement leur caractère bref, brutal et extrême. leur rapidité d'évolution leur donne une allure torrentielle sur les hydrogrammes de crues bien qu'elle change selon les types et caractéristiques de la crue en question. Leurs causes de genèse se réfèrent essentiellement aux conditions météorologiques, et elles se produisent plus fréquemment à partir de l'automne jusqu'au début du printemps. A l'instar des étiages, les crues d'Inaouène varient aussi dans l'espace entre station aval et station amont. Les crues enregistrées en amont (Bab Marzouka) sont plus puissantes par rapport à celles observées en aval. Ceci peut s'expliquer par la pente moyenne du bassin et celle du cours d'eau principal. Ces deux paramètres s'affaiblissent énormément dans la basse vallée d'Inaouène (secteur d'El Kouchat).

Bibliographie

Liste des références

- ASSANI A.A 2004 - Comparaison de la variabilité inter-annuelle des débits en fonction de régimes hydrologiques artificialisés dans un complexe de barrages sur la rivière Saint-Maurice (Québec, Canada). Bulletin de la société géographique de Liège, n°44, pp. 87-96.
- ASSANI A.A et TARDIF A. 2004 – Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada), Approche éco-géographique. Revue des sciences de l'eau, pp. 247-266.
- EL BARDAI R & TARGUISTI K. & ALUNI K. 2014 - Caractérisation hydrodynamique des sources karstiques : cas de la source de Ras El Maa (Rif Septentrional, Maroc). Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 27 (2), 139–153. <https://doi.org/10.7202/1025564ar>
- BAIDDAH A. et al. 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.
- DERRUAU M. 1969 - Les formes du relief terrestre. Paris, A. Colin, 213 p.
- DUBREUIL P. 1974 – Initiation à l'analyse hydrologique. Édit MASSON, 214p.
- EL ADLOUNI S. & BOBÉE B. 2014- Analyse fréquentielle hydrologique : Logiciel HYFRAN-PLUS (version V.2-1). CRNSG/Hydro-Québec, 71p.
- EL BOUTE S. 2014 - Les écoulements superficiels dans le Haut Inaouène et leurs impacts au niveau de la commune urbaine Oued Amlil (Taza-Maroc). Mémoire de MASTER, Faculté des lettres et des sciences humaines IBN TOFAIL, 117p.
- FRÉQUAT R. 1973 – La Moselle et son bassin : Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en milieu tempéré océanique. La Houille Blanche/ N° 4, pp. 303-311.
- GARTET A. 1994 - Morphogenèse et Hydrologie dans le bassin versant de l'Oued Lebène : Rif méridional et Pré rif central et oriental, Maroc. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I, 337 p.
- GEORGE P. 1970 - Dictionnaire de la Géographie. Presses Universitaires de France, 451p.
- GISCHER L. & HALLOT E. & al. 2012 – Analyse des débits en période de tarissement : essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de la Meuse (Belgique). BSGLg, 59,2012,59-80, pp. 22.

GUIGO M. 1975 - Essai de bilan hydrologique sur un petit bassin-versant de l'Apennin padan: le Parma. In: Revue Géographique de l'Est, tome 15, n°1-2. Modalités de l'écoulement et étiages fluviaux en milieux tempérés. pp. 63-87; doi : <https://doi.org/10.3406/rgest.1975.1310>

LAMBERT R. 1975- Été, étiage et tarissement des cours d'eau dans le bassin garonnais. In: Revue Géographique de l'Est, tome 15, n°1-2, Janvier-juin 1975. Modalités de l'écoulement et étiages fluviaux en milieux tempérés. doi : <https://doi.org/10.3406/rgest.1975.1315>

LANG C. 2007 - Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse Doctorat, Université de Metz, 287p.

LANG C. 2011 - Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. Cybergeo : European Journal of Geography, 21 p.

LANG C. & GILLE E. 2006 - Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. Norois [En ligne], 201 | 2006/4, mis en ligne le 01 décembre 2008, consulté le 19 avril 2019. pp. 32-43. URL : <http://journals.openedition.org/norois/1743> ; DOI : 10.4000/norois.1743

MEYLAN P. & MUSÉ A. 1999 – Hydrologie fréquentielle. Département de Génie rural, Institut d'aménagement des terres et des eaux, Lausanne, Suisse, 70p.

MSATEF K. 2015 – Étude hydrologique du bassin versant de l'Oued Ouergha, Nord du Maroc. Mémoire MASTER, Faculté des sciences et techniques Fès, 100 p.

NAOURA J. et BENAAVIDATE L. 2014 - Étude du régime hydrologique du fleuve Inaouène, Maroc septentrional. European Scientific Journal, vol. 10, pp.143-153.

OBDA K. 2007 – Etiages : indigences extrêmes menaçant la pérennité et les écosystèmes des oueds méditerranéens. Support d'UE Risques Hydrologiques. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs, pp. 190-247.

Organisation Météorologique Mondiale. 1994 - Guide des pratiques hydrologiques. OMM-n°168, Cinquième édition, Genève, 789 p.

MONIOD F. 1969 – Calcul automatique des paramètres de l'hydrogramme standard. Cahiers O.R.S.T.O.M. Série Hydrol., Vol. VI, n° 2. pp 77-97.

PEDELABORDE P. 1968 – Les bilans hydriques. Cahiers de géographe du Québec, 12 (25), 5-23. 20p. <https://doi.org/10.7202/020784ar>

RAMBERT B. 1971 – Application de l'analyse des hydrogrammes des cours d'eau à l'évaluation de l'écoulement souterrain. Rapport préliminaire. BRGM. 34p.

ROBILLARD D. 1978 – Etude structural du Moyen-Atlas Septentrional (région de Taza). Thèse de doctorat. Université des Sciences et Techniques de Lille. 178p.

SAIDI M.E. 1995 - Contribution à l'hydrologie profonde et superficielle du bassin du Souss (Maroc) : climatologie, hydrologie, crues et bilans hydrologiques en milieu sub-aride. Thèse Doctorat, Université Paris IV-Sorbonne, 212p.

TAOUS A. 2005 – Géomorphodynamique fluviale. Publications de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines Saïs-Fès, Série : « Thèses et Monographies » N°11. 425p.

SANDERS L. 1990 – L'analyse des données appliquées à la géographie. Collection Alidade. Groupement d'Intérêt Public RECLUS Montpellier. 267 p.

Références des cartes utilisées :

- Carte topographique, 1/50 000 : feuilles Aknoul, Ain Boukellal, Ain El-Behira, Bab-Mrouj, Béni Frassène El-Menzel, Fès-Est, Kelaa-des-Slès, Maghraoua, Matmata, Ribat El-Khir, Tahla, Tainaste, Taza.
- Carte géologique, 1/500 000 : feuille de la chaîne rifaine
- Images satellites de haute résolution SASPlanet.

Sites internet

<https://hal.archives-ouvertes.fr>

<https://journals.openedition.org>

<https://www.persee.fr>

<http://hydrologie-2.org>

<https://www.openstreetmap.org>

Liste des cartes

Carte 1 - Localisation géographique du bassin-versant d’Inaouène	8
Carte 2 - Répartition des tranches d’altitudes du bassin de l’oued Inaouène à la confluence avec l’oued Lebène.....	17
Carte 3 – Répartition des pentes dans le bassin versant de l’oued Inaouène.....	21
Carte 4 – Répartition spatiale de la pluviométrie dans le bassin d’Inaouène	23
Carte 5 + 6 - Evolution de l’indice de NDVI dans le bassin d’Inaouène entre l’année 1989 et l’année 2019.....	33
Carte 7 – Répartition spatiale des faciès lithostrucuraux du bassin d’Inaouène.....	38
Carte 8 – Perméabilité des roches du bassin d’Inaouène	40
Carte 9 – Hiérarchisation du réseau hydrographique selon le système de Strahler	42
Carte 10 – Découpage administrative au sein du bassin-versant d’Inaouène.....	48
Carte 11+12 – Evolution de la population des communes du bassin d’Inaouène dans les deux derniers recensements (2004-2014).....	50
Carte 13+14 - Densité humaine dans les communes du bassin d’Inaouène selon les deux derniers recensement (2004-2014)	51

Liste des figures

Figure 1 - Coupe topographique dans le secteur d’amont du bassin-versant d’Inaouène (du Moyen-atlas au Prérif).....	16
Figure 2 - Coupe topographique dans le secteur moyen du bassin-versant d’Inaouène (du Moyen-atlas au pré rif).....	16
Figure 3 - Coupe topographique dans la basse vallée du bassin-versant d’Inaouène (Sillon sud-rifain)	16
Figure 4 – Courbe hypsométrique du bassin versant de l’oued Inaouène	18
Figure 5 - Répartition du pourcentage des pentes dans le bassin	20
Figure 6 - Régime pluviométrique mensuel des stations climatiques du bassin d’Inaouène.....	25
Figure 7 – Période d’abondance et d’indigence pluviométrique au niveau des stations climatiques du bassin d’Inaouène selon le coefficient pluviométrique (CF)	26

Figure 8 - Variation interannuelle des précipitations annuelles aux stations du bassin d’Inaouène.....	27
Figure 9 – L’indice SPI pour les stations du bassin d’Inaouène.....	28
Figure 10 – Répartition mensuelle des températures au niveau de la station de Taza	29
Figure 11 - Températures mensuelles au niveau de la station de Bab Boudir	29
Figure 12 - Diagramme ombrothermique de Gaußen et Bagnols pour la station de Taza et Bab Boudir	31
Figure 13 - Coupe géologique dans le Prérif, zone de Sebt Boukellal, (D Leblanc, 1976)	35
Figure 14 - Coupe géologique dans le sillon sud-rifain (d’après ROBILLARD, 1978).....	36
Figure 15– Coupe schématique, interprétative et composé dans le Moyen-atlas	37
Figure 16 - La superficie (en %) des types de faciès rocheux selon leur perméabilité	39
Figure 17 – Taux d’évolution moyenne annuel (TAMA) des communes du bassin-versant d’Inaouène.....	49
Figure 18 – Types d’influence anthropique sur le plan hydrologique	53
Figure 19 – Périodes d’été et hiver hydrologiques dans le bassin d’Inaouène	69
Figure 20 – Courbes de débits moyens journaliers dans le bassin d’Inaouène	75
Figure 21 – débits cumulatifs de l’oued Inaouène dans les différentes sections mesurées ...	76
Figure 22 – Débits journaliers classés de l’Oued Inaouène	77
Figure 23– Courbe des débits journaliers cumulatifs des années représentatives	79
Figure 24 -Répartition des débits journaliers de l’O. Inaouène à Bab Marzouka au cours de l’année 2009-10.....	79
Figure 25 - Répartition des débits journaliers de l’O. Inaouène à Bab Marzouka au cours de l’année 2006-07.....	80
Figure 26 - Répartition des débits journaliers de l’O. Inaouène au cours de l’année 1979-80	81
Figure 27 – Régime hydrologique mensuel de l’oued Inaouène	83
Figure 28 – Coefficient mensuel des débits de l’oued Inaouène	84
Figure 29 – Variation interannuelle des débits mensuels de l’oued Inaouène à la station hydrologique El Kouchat	85
Figure 30 – Variation interannuelle des débits mensuels de l’oued Inaouène à la station hydrologique Bab Marzouka	86
Figure 31 – Variation interannuelle des débits mensuels de l’oued Inaouène à la station hydrologique Bab Chhoub.....	86

Figure 32– Variation interannuelle des débits annuels à la station hydrologique El Kouchat	88
Figure 33– Variation interannuelle des débits annuels à la station hydrologique Bab Marzouka.....	88
Figure 34 – Variation interannuelle des débits annuels à la station hydrologique Bab Chhoub	89
Figure 35 – Les écarts à la moyenne des débits annuels de l'Oued Inaouène	90
Figure 36 – Coefficient d'hydraulité des débits de l'oued Inaouène	90
Figure 37 - Corrélation entre les pluies et les débits de l'oued Inaouène à la station de Bab Marzouka.....	91
Figure 38 – Débits mensuels d'étiage de l'oued Inaouène	102
Figure 39 – Débits spécifiques mensuels d'étiage	103
Figure 40 – Exemple de courbe enveloppe de tarissement et de courbe de séquences de tarissement (modifié d'après Lang & Gilles, 2006)	105
Figure 41 – Fréquence des types d'étiage pendant le tarissement de 1981.....	108
Figure 42 – Fréquence des types d'écoulement pendant le tarissement de 1988 au niveau des deux stations de l'oued Inaouène	109
Figure 43 – Tarissement hydrologique de l'année de 1981 et types d'étiage.....	110
Figure 44 – Tarissement hydrologique de l'été de l'année de 1988 et types d'étiage.....	111
Figure 45 – Variations interannuelles des débits maximums annuels de l'oued Inaouène ..	116
Figure 46 - Indice de sévérité des crues (Is) de l'oued Inaouène à partir des débits maxima annuels	117
Figure 47 – Ajustement des débits maximums journaliers de la station de Bab Marzouka à de la loi de Gumbel.....	119
Figure 48 – Ajustement des débits maximums journaliers de la station d'El Kouchat à de la loi de Gumbel	119
Figure 49 - Ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits de la station d'El Kouchat.....	121
Figure 50 - Ajustement graphique pour les pluies et droite d'extrapolation pour les débits de la station de Bab Marzouka.....	121
Figure 51 – Carte météorologique de 500 hPa Géopotentiel du 16 novembre 1993(à 6h UTC).....	124

Figure 52 – Carte météorologique de la pluviométrie probable à 6h UTC du 16 novembre 1993.....	124
Figure 53 – Décomposition des phases de la crue de 16 novembre 1993 enregistrée à la station d'El Kouchat.....	126
Figure 54 – Carte météorologique de 500 hPa Géopotentiel du de 9 mars 2010 (à 6h UTC).....	127
Figure 55 – Carte météorologique de la pluviométrie probable à 6h UTC du de 9 mars 2010	127
Figure 56 – Décomposition des phases de la crue de 9 mars 2010 enregistrée à la station de Bab Marzouka.....	129

Liste des tableaux

Tableau 1 – Une synthèse des différents paramètres et méthodes pour la caractérisation hydrologique de l'oued Inaouène	10
Tableau 2 - Caractéristiques hydrométriques des stations de jaugeage dans le bassin d'Inaouène.....	11
Tableau 3- Répartition des surfaces des tranches d'altitude dans le bassin d'Inaouène.....	17
Tableau 4 – Altitudes caractéristiques du bassin de l'oued Inaouène	19
Tableau 5 – Indices de pentes du bassin versant de l'oued Inaouène	20
Tableau 6– Les isohyètes et leur surface dans le bassin	22
Tableau 7 – Situation géographique des stations climatiques du bassin d'Inaouène	24
Tableau 8 - Classes de l'indice standardisé des précipitationsTaza	28
Tableau 9 - Classification du climat méditerranéen selon l'indice xérothermique de Bagnols et Gaussen (1954)	30
Tableau 10 - Indice de recouvrement forestier au niveau du bassin d'Inaouène	32
Tableau 11 – Paramètres morphométriques du bassin d'Inaouène	41
Tableau 12- Correspondance entre l'ordre réel et l'ordre obtenu à partir des cartes topographiques	43
Tableau 13 - Caractéristiques du cours d'eau principal	44
Tableau 14– Classe des pentes le long d'un cours d'eau (GARTET, J. 2010)	44

Tableau 15– Densité démographique du bassin d’Inaouène.....	52
Tableau 16 – Caractéristiques des barrages hydrauliques du bassin d’Inaouène (Idriss 1 ^{er} et Bab Louta.....	54
Tableau 17 – Méthode de calcul de la lame d’eau écoulée d’un cours d’eau.....	63
Tableau 18- Facteur de correction K	64
Tableau 19 – Les valeurs de IgA et H et h pour le bassin d’Inaouène selon sa situation géographique	65
Tableau 20 – Bilan hydrologique du bassin d’Inaouène à El KouchetR	68
Tableau 21 – Bilan hydrologique du bassin d’Inaouène à Bab Marzouka	68
Tableau 22 – Lames d’eau précipitée dans les différentes sections du bassin d’Inaouène	70
Tableau 23 – Lame d’eau écoulée dans les stations du bassin d’Inaouène.....	71
Tableau 24 - Bilan hydrologique annuel dans les différentes sections du bassin d’Inaouène	72
Tableau 25 – Débits caractéristiques de l’oued Inaouène	78
Tableau 26 – Débits caractéristiques des années représentatives de l’oued Inaouène	82
Tableau 27 – Coefficient de variation des débits mensuels de l’oued Inaouène	85
Tableau 28– Valeurs d’étiages extrêmes annuels (EEA) au niveau de l’oued Inaouène	99
Tableau 29 - Période d’apparition des étiages extrêmes annuels	100
Tableau 30– Débits caractéristiques d’étiage (en m ³ /s) au niveau de l’oued Inaouène	100
Tableau 31 – Apparition des débits mensuels d’étiage	102
Tableau 32 – Variation spatio-temporelle de l’indice de sévérité des étiages	104
Tableau 33 - Types caractéristiques d’étiage, et vidange des nappes (D’après Abdelghani GARTET).....	106
Tableau 34 – Fréquence (%) et durée des types d’étiage pendant le tarissement de 1981 .	108
Tableau 35 – Propriétés hydrologiques et hydrogéologiques des tarissements de 1981 et 1988.....	110
Tableau 36 – Tarissement de 1980-81 et ses propriétés en fonction des méthodes d’extraction.....	111
Tableau 37 – Tarissement de 1987-88 et ses propriétés en fonction des méthodes d’extraction	112
Tableau 38 – Estimation des débits de crue de l’Oued Inaouène pour différentes périodes de retour.....	120

Tableau 39 – Débits de pointe extrapolés pour la station d’El Kouchat par la méthode de GRADEX	122
Tableau 40 – Débits de pointe extrapolés pour la station de Bab Marzouka par la méthode de GRADEX.....	122
Tableau 41 – Caractéristiques hydrologiques associées à la crue de 16 novembre 1993....	126
Tableau 42 – Caractéristiques hydrologiques associées à la crue de de 9 mars 2010	129

Liste des photos

Photo 1 - Barrage hydraulique Idriss Premier (oued Inaouène)	54
Photo 2 - Barrage hydraulique Bab Louta (oued Bousbâa)	54

Table des matières

Résumé	3
INTRODUCTION GENERALE	6
Localisation géographique de zone d'étude	7
Problématique.....	9
Méthodologie et matériel	9
Première Partie Les conditions de l'écoulement fluvial dans le bassin versant de l'oued Inaouène.....	12
Introduction de la Première Partie	13
Chapitre 1 : Contexte physique du bassin-versant d'Iaouène.....	14
Introduction.....	15
1- Topographie du bassin	15
1-1 Hypsométrie du bassin.....	16
1-1-1 La répartition des tranches d'altitudes.....	16
1-1-2 Courbe hypsométrique et altitudes caractéristiques.....	18
1-2 Influence de la pente du bassin	19
1-2-1- Indices de pente	19
1-2-2- Répartition spatiale du système de pente	20
2- Contexte climatique	22
2-1 Précipitations	22
2-1-1- Lame d'eau précipitée.....	22
2-1-2- Régime pluviométrique.....	24
A- Régime mensuel.....	24
B- Précipitations annuelles.....	26
2-2 Températures.....	29
2-3 Relation entre les précipitations et la température.....	30
3- Couvert végétal	31
3-1 Indice de recouvrement forestier (If).....	31
3-2 Indice normalisé de densité végétale (NDVI)	32
4- Cadre Géologique.....	34
4-1 Contexte lithostructural	34

4-1-1- Complexe pré rifain.....	34
4-1-2- Sillon Sud Rifain.....	35
4-1-3- Moyen-Atlas septentrional.....	36
4-2 Perméabilité du bassin	39
5- Morphométrie du bassin versant et de son réseau hydrographique	40
5-1 Géométrie du bassin	40
5-2 Réseau hydrographique et sa morphométrie	41
5-2-1- Hiérarchisation du réseau hydrographique.....	41
5-2-2- La densité de drainage (Dd)	43
5-2-3- Longueur et pente moyenne de cours d'eau principal	43
Conclusion du chapitre.....	44
Chapitre 2 : Cadre humain du bassin Inaouène	46
Introduction.....	47
1- Découpage administrative	47
2- Evolution démographique	48
2-1 Population recensée.....	48
2-2 Taux d'évolution moyen annuel (TAMA)	49
3- Densité humaine	52
4- Interventions anthropiques et effets sur l'écoulement	53
4-1 L'imperméabilisation du bassin	53
4-2 L'effet des aménagements hydrauliques	53
4-3 Exploitation des ressources hydriques	55
Conclusion du chapitre.....	55
Conclusion de la Première Partie	57
Deuxième partie :Bilan hydrologique du bassin versant et caractérisation du régime hydrologique de l'oued Inaouène	58
Introduction de la Deuxième Partie	59
Chapitre 3 :Bilan hydrologique du bassin versant d'Inaouène	60
Introduction.....	61
1- Paramètres de base du bilan hydrologique	61
1-1 Lames d'eau précipitées.....	62
1-2- Ecoulement (Q).....	62

1-3 Evapotranspiration.....	63
1-3-1- Formule de Thornthwaite.....	63
1-3-2- Formule de Turc.....	64
1-4 La variation des réserves (ΔR)	66
2- Etablissement du bilan hydrologique.....	67
2-1 Bilan mensuel	67
2-2 Bilan annuel.....	70
Conclusion du chapitre.....	72
Chapitre 4 :Caractérisation du fonctionnement hydrologique de l'oued Inaouène et variations naturelles des débits	73
Introduction.....	74
1- Débits moyens journaliers.....	74
1-1 Courbe des débits moyens journaliers.....	74
1-2 Courbe des débits cumulatifs.....	75
1-3 Courbe des débits classés	76
1-4 Débits caractéristiques.....	77
1-5 Débits journaliers : étude des situations hydrologiques particulières.....	78
1-5-1- Année humide (2009-2010).....	79
1-5-2- Année sèche (2006-07).....	80
1-5-3- Année normale (1979-80).....	81
2- Débits mensuels : variation et régime	82
2-1 Régime mensuel des débits.....	82
2-2 Coefficient mensuel des débits	83
2-3 Variation interannuelle des débits mensuels.....	85
3- Débits annuels.....	87
3-1 Variations des modules annuels	87
3-2 Méthode des écarts à la moyenne	89
3-3 Coefficient d'hydraulicité	90
3-4 Relation entre les précipitations et débits annuels	91
Conclusion du chapitre.....	92
Conclusion de la Deuxième Partie.....	93
Troisième partie : Étude des situations extrêmes de l'écoulement de l'oued Inaouène (étiages et crues)	94

Introduction de la Troisième Partie	95
Chapitre 5 : Etiages de l'oued Inaouène : caractérisation et variations spatio-temporelles...	96
Introduction.....	97
1- Caractérisation des étiages	97
1-1 L'analyse de l'étiage extrême annuel (EEA)	98
1-2 Débit caractéristique d'étiage (DCE)	100
1-3 Débit mensuel d'étiage (QMMA)	101
2- Analyse des débits d'étiage en période de tarissement	104
2-1 Détermination de la période de tarissement.....	105
2-1-1 La méthode des « courbes enveloppes ».....	105
2-1-2 La méthode des « courbes séquences »	105
2-1-3 La méthode des « courbe des débits décroissants »	106
2-2 Tarissement hydrologique et types caractéristiques d'étiages	106
2-2-1 Tarissements extraits par la méthode de la courbe des débits décroissants.....	107
2-2-2 Comparaison des tarissements obtenus par les différentes méthodes d'extraction.....	111
Conclusion du chapitre.....	112
Chapitre 6 : Crues de l'Oued Inaouène : caractérisation et variation spatio-temporelles....	114
Introduction.....	115
1- Débits maximaux annuels et sévérité des crues de l'oued Inaouène	115
2- Prédétermination des débits de pointe de crues de différentes périodes de retour.....	117
2-1 Estimation par l'analyse fréquentielle- <i>Gumbel</i>	117
2-2 Estimation des débits de crues de fréquence rare par la méthode de GRADEX	120
3- Etude de cas : Analyse des crues à l'aide des hydrogrammes	122
3-1 Méthode de décomposition des phases de tarissement.....	123
3-2 Hydrogramme d'une crue simple.....	124
3-3 Hydrogramme des crues composites.....	127
Conclusion du chapitre.....	130
Conclusion de la Troisième Partie	131
CONCLUSION GENERALE	133
Bibliographie	136
Liste des cartes	139
Liste des figures.....	139
Liste des tableaux.....	142

Liste des photos..... 144