



HAL
open science

Étiage et tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (amont Oum-Er-Rbia-Maroc) (1976-2019) : identification, analyse et impact

omar Ghadbane

► To cite this version:

omar Ghadbane. Étiage et tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (amont Oum-Er-Rbia-Maroc) (1976-2019) : identification, analyse et impact. Géographie. Université Sultan Moulay Slimane (Beni Mellal, Maroc), 2022. Français. NNT : . tel-04174488

HAL Id: tel-04174488

<https://theses.hal.science/tel-04174488>

Submitted on 1 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Sultan
Moulay Slimane



Laboratoire Dynamique des Paysages,
Risques et Patrimoine



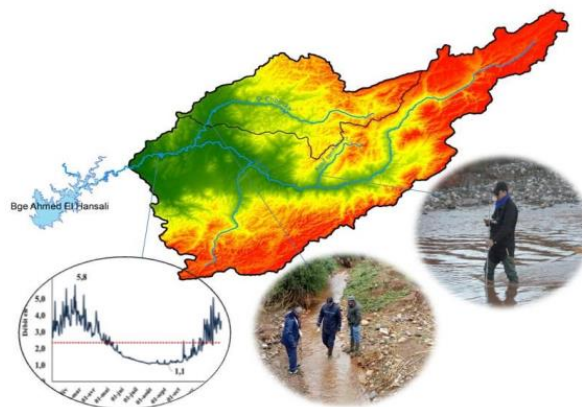
Faculté des Lettres et des
Sciences Humaines,
Béni Mellal

Thèse de doctorat de l'université Sultan Moulay Slimane

Centre doctoral des Lettres et des Sciences Humaines

Discipline : Géographie Physique

Étiage et tarissement dans le bassin versant de l'oued Srou (amont Oum Er Rbia-Maroc) (1976-2019) : Détermination, analyse et impact



Préparée par : Omar GHADBANE

Soutenue publiquement le 31 mars 2022 devant les membres de jury, composé de :

| | | |
|------------------------------|-------------------------|--------------------------------|
| <i>Pr. Ahmed OULOUM</i> | <i>FLSH Béni Mellal</i> | <i>Président</i> |
| <i>Pr. Mohamed El Ghachi</i> | <i>FLSH Béni Mellal</i> | <i>Directeur de thèse</i> |
| <i>Pr. Ahmed Ait Moussa</i> | <i>FLSH Mohammadia</i> | <i>Examineur</i> |
| <i>Pr. Ahmed Barrakat</i> | <i>FST Béni Mellal</i> | <i>Examineur</i> |
| <i>Pr. Saïd ARIF</i> | <i>FLSH Béni Mellal</i> | <i>Examineur et rapporteur</i> |
| <i>Pr. Abdellah Bourak</i> | <i>ABH Oum Er Rbia</i> | <i>Expert</i> |

Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu de m'avoir donné la force, la patience et l'audace pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur soutien et leur collaboration de mener à bien ce travail. Voilà pourquoi, nous profitons de ce moment idéal pour nous adresser tout spécialement à :

Mon directeur de thèse, **M. Mohammed EL GHACHI**, pour la qualité de son encadrement, tant sur le plan scientifique qu'humain, ses encouragements et sa grande disponibilité au cours de ces six années. J'ai été chanceux et heureux d'avoir comme directeur de thèse un professeur comme vous. Vos compétences, votre sérieux, votre générosité scientifique, votre gentillesse et vos implications dans ce travail, m'ont beaucoup apporté, et je tiens à vous exprimer ma grande reconnaissance.

Merci cher professeur **Mr EL GHACHI**, qui a mis sa confiance en mes capacités, en acceptant de diriger cette thèse, et qui a su me motiver tout au long de ces années.

Je présente toute ma gratitude à **M. ELKHIDAR**, pour l'accompagnement, l'orientation qu'il m'a accordée et le soutien qu'il m'a apporté tout au long les cinq années de travail de terrain. J'ai été à la fois très heureux et honoré d'avoir travaillé avec lui.

Ma gratitude va à tous mes professeurs du département de géographie de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Béni Mellal, pour leurs débats, leurs encouragements et leurs soutiens et à tout le personnel de l'établissement.

Je remercie aussi le personnel de l'Agence du Bassin Hydraulique de l'*Oum-Er-Rbia*, notamment, **Mr. AHMED MARNOUNE**, qui m'a beaucoup facilité l'accès aux données hydro-climatiques des différentes stations et à la documentation de l'Agence.

Je remercie également mes chers amis, les doctorants du département de géographie **CHAKIR, ELORFI, LAHLOU, BISSOUR, ACHEHBOUNE, OUAKHIR ET ELHAWARI** pour leurs aides et leurs soutiens.

Je voudrais enfin remercier toute ma famille : **MA MÈRE, MA FEMME FATIMA-EZZAHRA, MA FILLE ZAYNAB, MON NOUVEAU-NÉ MOHAMED ET MES FRÈRES.**

Résumé

Étiage et tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (amont Oum-Er-Rbia-Maroc) (1976-2019) : identification, analyse et impact

Le Maroc se trouve particulièrement touché par le problème de la pénurie en eau, du fait de la démographie croissante, du développement continu des secteurs industriels et agricoles, ainsi que l'impact des changements climatiques. Cependant, pour bien gérer la ressource en eau dans une telle situation, il est essentiel de connaître le disponible en eau, ainsi que ses différentes utilisations, surtout en périodes d'étiage.

Cette thèse traite une problématique visant la caractérisation et l'évaluation de la ressource en eau en période des basses eaux, en particulier durant les phases des étiages, dans un contexte climatique semi-aride, celui du bassin versant de l'oued Srou. Ce bassin du moyen-Atlas appartient au grand "château d'eau" du Maroc. Il constitue le premier affluent de l'oued Oum-Er-Rbia qui le rejoint au niveau du barrage d'Ahmed Elhansali, qui garantit l'approvisionnement du périmètre irrigué du Béni Amir, du complexe industriel de l'OCP et l'AEP de plusieurs villes. Les données utilisées concernent les données hydro-climatiques des stations du bassin versant de l'oued de Srou (Aval Elhri et Chacha N'mallah) et des stations avoisinantes pour la chronique d'étude 1976 à 2016, soit 41 ans d'observation, en plus des données des campagnes de jaugeage et de mesure de la qualité physique des eaux de surfaces réalisées dans la zone entre 2016 et 2019.

Nous avons procédé d'abord à la reconnaissance des facteurs naturels, qui régissent le fonctionnement hydrologique dans le bassin versant : la topographie, le relief, la géologie, la végétation et l'occupation du sol. En deuxième étape, une quantification des ressources en eau a été réalisée, en se basant sur les données hydro-climatiques des différentes stations, tout en déterminant les périodes humides et les périodes sèches, durant les quatre dernières décennies. Plusieurs indices ont été adoptés, pour identifier les fluctuations pluviométriques et leurs impacts sur le fonctionnement hydrologique du bassin de l'oued de Srou. La troisième étape a été consacrée à l'étude des étiages et des tarissements dans le bassin. Nous avons donc essayé d'identifier les débits d'étiage, en utilisant les différents indicateurs statistiques (QMNA, VCN et DC). Nous avons procédé à des analyses statistiques et fréquentielles de ces débits, dans le but d'apporter des éléments d'explication du fonctionnement des cours d'eau en période d'étiage. L'analyse du tarissement des cours d'eau du bassin versant de l'oued de Srou apporte des éléments d'explication du fonctionnement des cours d'eau en période d'étiage. Dans le but de la validation des résultats statistiques, un suivi de l'évolution quantitative et qualitative a été réalisé à l'échelle des bassins unitaires du bassin versant de l'oued de Srou

En termes de résultats, les périodes d'étiage connaissent une variabilité importante à l'échelle spatio-temporelle. En effet, elles varient en fonction des entrées pluviométriques et en fonction de la géologie des sous bassins. Les périodes de tarissement sont marquées par une absence d'apports pluviométriques et durant lesquelles le débit des cours d'eau est réduit à l'apport des nappes souterraines. Durant ces périodes, les cours d'eau sont donc alimentés par les nappes du Moyen-Atlas, dont les capacités et les rythmes de vidange varient. Cette variabilité s'explique par les diversités géologiques des sous bassins qui peuvent survenir dans les cours d'eau. Dans le but de dépasser le manque en matière de gestion des étiages dans les lois marocaines, nous avons essayé de définir des seuils propres à notre bassin, sur la base de la législation internationale. Nous avons testé plusieurs méthodes, pour définir des débits d'entrée aux étiages et le choix du débit d'entrée aux étiages a été fixé sur le Q_{75} . Le suivi de la variation des débits et de la qualité des principaux cours d'eau du bassin entre 2016 et 2019, nous a permis de comprendre les modalités de l'écoulement, l'état de la qualité des eaux et d'identifier le rendement hydrologique des bassins unitaires en périodes d'étiages.

Mots clés : bassin versant de l'oued de Srou (Maroc), Ressources en eau, étiage, tarissement, quantification

Abstract

Low flow and drying up in the watershed of the Srou wadi (upstream Oum-Er-Rbia-Morocco) (1976-2019): identification, analysis and impact

Morocco is particularly affected by the problem of water scarcity, due to growing demography, the continuous development of the industrial and agricultural sectors as well as the impact of climate change. However, to properly manage water resources in such a situation, it is essential to know what water is available as well as its different uses, especially during low-flow periods.

this thesis deals with the issue of evaluating the water resource available during low water periods in a semi-arid hydro-climatic context, of the Srou river watershed. This basin of the Middle Atlas belongs to the great "water reserve" of Morocco and constitutes the first tributary of the Oum-Er-Rbia river and the Ahmed Elhansali dam. The latter provides water supply for: the Tadla irrigated perimeter, the mining industry (OCP) and drinking water supply. The methodology adopted is based on a geographic method with two hydrological drivers: quantitative hydrology and qualitative hydrology. The data used concerns the hydro-climatic data of the stations of the watershed of the river of Srou (Aval Elhri and Chacha N'mallah) and of the neighbouring stations for the study chronicle 1976 to 2016, i.e. 41 more years of observation. data from the gauging and measurement campaigns of the physical quality of surface water carried out in the area between 2016 and 2019.

We proceeded to the recognition of the natural factors which govern the hydrological functioning in the watershed: topography and relief, geology, vegetation, and land use. In the second step, a quantification of the water resources was carried out based on hydro-climatic data from the various stations, this by determining the wet periods and the dry periods during the last four decades. Several indices have been adopted to identify rainfall fluctuations and their impacts on the hydrological functioning of the Srou wadi basin. The third step is devoted to the study of low water levels and dry periods in the basin. We tried to identify the low flow rates using the different statistical indicators (MMF, MAM and FDC). We carried out statistical and frequency analysis of these flows to provide explanations for the functioning of rivers during low water periods. The analysis of the drying up of the rivers in the Srou river watershed provides elements to explain the functioning of the rivers during the low flow period. To validate the statistical results, a monitoring of the quantitative and qualitative evolution is carried out in the unit basin scale of the watershed of the river of Srou

In terms of results, the low water periods experience significant variability on a spatio-temporal scale. Indeed, they vary according to the rainfall inputs and according to the geology of the sub-basins. Drying periods are marked by an absence of rainfall during which the flow of rivers is reduced to the contribution of groundwater. During these periods, the rivers are therefore fed by aquifers from the Middle Atlas, the capacities, and rates of emptying of which vary. This variability is explained by the geological diversities of the sub-basins that can occur between rivers. To overcome the lack of low flow management materials in Moroccan laws, we have tried to define thresholds specific to our basin on the basis of international legislation. We have tested several methods to define low flow inlet flows, the choice of low flow inlet flow is fixed on the Q_{75} . Monitoring the variation in flows and the quality of the main rivers in the basin between 2016 and 2019 has enabled us to understand the flow modalities, the state of quality and to identify the hydrological performance of the unit basins during low water periods.

Keywords: watershed of the Srou river (Morocco), Water resources, low flow, drying, quantification

ملخص

الشح المائي وصيبب النضوب بحوض واد صرو (عالية أم الربيع-المغرب) (1976-2019): التحديد، التحليل والتأثير

يتأثر المغرب بشكل خاص بمشكلة ندرة المياه، وذلك بسبب النمو الديموغرافي، والتطور المستمر في قطاعي الصناعة والزراعة وتأثير التغير المناخي. من أجل تسيير ناجح وعقلاني للموارد المياه في مثل هذه الظروف سيكون من الضروري معرفة ما هو متوفر من المياه وكذلك المتطلبات المختلفة، خاصة خلال فترات الشح المائي.

تتناول هذه الأطروحة مسألة تقييم الموارد المائية المتاحة، خلال فترات انخفاض المياه في سياق مناخي شبه جاف، بحوض واد صرو. ينتمي هذا الحوض الى الأطلس المتوسط "خزان الماء" الكبير للمغرب، ويشكل الرافد الأول لوادي أم الربيع وسد أحمد الحنصالي. يوفر هذا الأخير إمدادات مائية لسهل تادلة المسقي والصناعة المنجمية (OCP) ومياه الشرب.

تعتمد المنهجية المعتمدة على طريقة جغرافية ذات محركين هيدرولوجيين: الهيدرولوجيا الكمية والهيدرولوجيا النوعية. بالنسبة للمعطيات المستخدمة في هذه الأطروحة والخاصة بالتساقطات المطرية والصيبب، فمصدرها محطتي شاشة أملاح وسافلة الهري كما اعتمدنا على عدة محطات مجاورة للحوض. وتم اعتماد الفترة من 1976 إلى 2016 أي 41 سنة للدراسة. كما تم الاعتماد على معطيات الدراسة الميدانية الخاصة بتتبع تطور كمية وجودة مياه حوض واد صرو والتي أجريت في المنطقة بين عامي 2016 و2019.

قمنا في البداية، بتشخيص العوامل الطبيعية التي تتحكم في الأداء الهيدرولوجي للحوض النهري: التضاريس والجيولوجيا والغطاء النباتي. في الخطوة الثانية، تم إجراء تقدير كمي للموارد المائية بناءً على المعطيات المناخية من عدة محطات، وذلك من أجل تحديد الفترات الرطبة وفترات الجفاف خلال العقود الأربعة الماضية. تم اعتماد العديد من المؤشرات لتحديد تقلبات هطول الأمطار وتأثيرها على الأداء الهيدرولوجي لحوض وادي صرو. الخطوة الثالثة مخصصة لدراسة مستويات الشح المائي في الحوض. حاولنا تحديد المعدلات باستخدام المؤشرات الإحصائية المختلفة QMNA و VCN و DC. لقد أجرينا تحليلات إحصائية وتحليلات التردد لهذه التدفقات من أجل تقديم تفسيرات لعمل المجاري المائية خلال فترات انخفاض المياه. يمكن تحليل صيبب النضوب في حوض وادي صرو من فهم عمل الأنهار خلال فترة الشح المائي. من أجل التحقق من صحة النتائج الإحصائية، سيتم إجراء مراقبة للتطور الكمي والنوعي بالأحواض الفرعية لحوض وادي صرو.

فيما يخص النتائج، تشهد فترات صيبب الشح، تغيرات كبيرة على النطاق المكاني والزمني. وهي تختلف في الواقع وفقاً لمداخلات هطول الأمطار وفقاً لحيولوجيا الأحواض الفرعية. تتميز فترات صيبب النضوب بغياب هطول الأمطار، حيث يتوقف مصدر تدفق الأنهار على مساهمة المياه الجوفية. خلال هذه الفترات، تتم تغذية الأنهار من خلال طبقات المياه الجوفية للأطلس المتوسط، والتي تختلف قدرات ومعدلات إفراغها. يمكن تفسير هذا التباين، من خلال التشكيلات الجيولوجية المختلفة المميزة للأحواض الفرعية. من أجل تجاوز النقص القانوني في إدارة صيبب الشح في القوانين المغربية، حاولنا تحديد عتبات خاصة بحوضنا، على أساس التشريعات الدولية. لقد اخترنا عدة طرق لتحديد قيمة كمدخل الى صيبب الشح، وتم تحديد العتبة Q75. مكنا رصد التباين في معدلات التدفق ونوعية الأنهار الرئيسية في الحوض بين عامي 2016 و2019، من فهم طرائق التدفق وحالة الجودة وتحديد الأداء الهيدرولوجي للأحواض الفرعية خلال فترات انخفاض المياه.

الكلمات المفتاح: حوض وادي صرو (المغرب)، موارد مائية، صيبب الشح، صيبب النضوب، تحديد كمي

Table des matières

| | |
|---|----|
| Remerciement..... | 1 |
| Résumé..... | 2 |
| Abstract | 3 |
| ملخص..... | 4 |
| Table des matières | 5 |
| Liste des abréviations | 13 |
| Introduction générale..... | 15 |
| I. Motivations de ce projet | 18 |
| 1. Motivations personnelles..... | 18 |
| 2. Motivations scientifiques..... | 18 |
| II. Présentation du bassin versant de Srou | 19 |
| III. Problématique d'étude..... | 21 |
| IV. Objectifs de la thèse | 22 |
| V. Méthodes, les approches et les outils | 23 |
| 1. Travail de terrain | 23 |
| 2. Analyses statistiques..... | 26 |
| 3. Outils utilisés..... | 27 |
| VI. Données utilisées..... | 27 |
| 1. Données cartographiques..... | 27 |
| 2. Données climatiques..... | 28 |
| 3. Données collectées du terrain..... | 28 |
| 4. Données du haut-commissariat au plan..... | 28 |
| VII. Structure de la thèse | 29 |
| Partie 1 : Le bassin versant de l'oued de Srou : Présentation, anthropisation et enjeux des étiages hydrologiques | 32 |
| Introduction de la première partie | 33 |
| Chapitre 1 : Caractéristiques générales du bassin versant de l'oued de Srou..... | 34 |
| Introduction du chapitre 1 | 35 |
| Axe 1 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued de Srou..... | 36 |
| 1. Superficie et périmètre du bassin | 36 |
| 2. Indice de Gravélius (K_G) | 38 |
| 3. Indice du rectangle équivalent..... | 38 |
| Axe 2 : Hypsométrie et système de pente du bassin versant de l'oued de Srou..... | 40 |
| 1. Hypsométrie du bassin versant de l'oued de Srou..... | 40 |
| 1.1. Répartition spatiale des tranches d'altitudes | 40 |

| | | |
|--|---|----|
| 1.2. | Courbes hypsométriques et altitudes caractéristiques | 43 |
| 2. | Système des pentes et leurs caractéristiques..... | 44 |
| 2.1. | Pente moyenne du cours d'eau..... | 44 |
| 2.2. | Indice de pente global..... | 45 |
| 2.3. | Dénivelée spécifique Ds | 46 |
| 2.4. | Répartition spatiale des pentes | 47 |
| 3. | Organisation du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou | 49 |
| 3.1. | Cartographie du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou | 49 |
| 3.2. | Longueur caractéristique du cours d'eau principale..... | 51 |
| 3.3. | Profile en long | 51 |
| 3.4. | Densité de drainage | 54 |
| Axe 3 : Présentation et analyse du milieu naturel du bassin versant de l'oued de Srou..... | | 55 |
| 1. | Géologie du bassin versant de l'oued de Srou..... | 55 |
| 1.1. | Histoire géologique de la formation des chaines Moyens Atlasiques | 57 |
| 1.2. | Formations lithologiques du bassin versant de l'oued de Srou | 57 |
| 1.3. | La tectonique | 60 |
| 1.4. | Entités structurales du bassin versant de l'oued de Srou..... | 61 |
| 2. | Perméabilité dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 62 |
| .2.1 | Ensembles lithologiques perméables..... | 62 |
| 2.2. | Ensembles lithologiques peu perméables..... | 64 |
| .2.3 | Les ensembles lithologiques imperméables | 64 |
| 2.4. | La perméabilité par sous bassin versant | 65 |
| 3. | Couvert végétal dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 66 |
| 3.1. | Principales forêts du bassin versant de l'oued de Srou | 68 |
| 3.2. | Matorral..... | 69 |
| 3.3. | Steppe et la pelouse | 70 |
| 3.4. | Terrains agricoles | 70 |
| 3.5. | Impact du couvert végétal sur l'écoulement..... | 71 |
| Conclusion du Chapitre 1 : | | 73 |
| Chapitre 2 : Anthropisation dans le bassin versant de l'oued de Srou | | 74 |
| Introduction du chapitre 2 | | 75 |
| Axe 4 : les caractéristiques humaines du bassin versant de l'oued de Srou | | 76 |
| 1. | Anthropisation : définition, processus et conséquences | 76 |
| 2. | Histoire des tribus du bassins versant de l'oued de Srou | 77 |
| 3. | Caractéristiques démographiques du bassin versant de l'oued de Srou | 79 |
| Axe 5 : Ressources en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou : un potentiel économique et un défi environnemental..... | | 83 |
| 1. | Agriculture dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 83 |
| 2. | Industrialisation dans le bassin versant de l'oued de Srou | 86 |

| | |
|--|-----|
| 2.1. Huileries | 86 |
| 2.2. Carrières | 87 |
| 2.3. Tourisme..... | 88 |
| Conclusion du chapitre 2 | 89 |
| Chapitre 3 : Le problème croissant de la ressource en eau, cadre théorique et méthodologique des étiages hydrologiques | 90 |
| Introduction du chapitre 3 | 91 |
| Axe 6 : Problème croissant de la ressource en eau au Maroc et dans le bassin versant de l’oued de l’Oum-Er-Rbia..... | 92 |
| 1. L’eau au Maroc : potentialité et impact..... | 92 |
| 1.1. L’état de l’aménagement et de l’utilisation de l’eau..... | 96 |
| 1.2. Enjeux liés à l’eau et la nécessité d’une gestion intégrée des sécheresses au Maroc..... | 98 |
| 2. L’eau dans le bassin versant de l’Oum-Er-Rbia entre le disponible et les besoins | 99 |
| 2.1. Présentation du bassin versant de l’Oum-Er-Rbia..... | 99 |
| 2.2. Eaux de surface dans le bassin versant de l’oued de l’Oum-Er-Rbia..... | 101 |
| 2.3. Eaux souterraines dans le bassin versant de l’oued de l’Oum-Er-Rbia..... | 101 |
| 2.4. Utilisation des eaux de l’Oued Oum-Er-Rbia..... | 102 |
| Axe 7 : Définition et méthodes d’identification des débits d’étiage | 104 |
| 1. Définitions hydrologiques des étiages..... | 104 |
| 1.1. Distinction entre étiage et basses eaux | 105 |
| 1.2. Distinction entre étiage et sécheresse hydrologique..... | 106 |
| 2. Définition statistique et indicateurs des débits d’étiage | 108 |
| 2.1. Débits d’étiage à l’échelle annuelle..... | 109 |
| 2.2. Les débits minimaux annuels associés à une période de retour | 110 |
| 2.3. Débits classés comme outils de caractérisation des débits d’étiages..... | 112 |
| Axe 8 : Définitions et méthodes d’identification des tarissements | 115 |
| 1. Définition des tarissements..... | 115 |
| 2. Lois qui régissent les tarissements | 116 |
| 3. Identification des débits de tarissement..... | 118 |
| 3.1. Méthode de la « courbe enveloppe » | 118 |
| 3.2. Méthode de la « courbe séquence »..... | 119 |
| 3.3. Méthode de la « courbe de décroissance » | 119 |
| Conclusion du chapitre 3..... | 121 |
| Conclusion de la première partie..... | 122 |
| Partie 2 : Le fonctionnement hydro-climatique du bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)..... | 123 |
| Introduction de la deuxième partie | 124 |
| Chapitre 4 : Présentation des stations hydro-climatiques et critique des données dans le bassin versant de l’oued de Srou..... | 126 |
| Introduction du chapitre 4 | 127 |
| Axe 9 : Présentation des stations et critique des données..... | 128 |

| | | |
|------|---|-----|
| 1. | Répartition géographique des stations hydro-climatiques retenues..... | 128 |
| 1.1. | Stations pluviométriques | 130 |
| 1.2. | Stations thermométriques | 130 |
| 1.3. | Stations hydrométriques | 131 |
| 2. | Choix de la chronique de l'étude..... | 131 |
| | Axe 10 : Contrôle de la qualité et homogénéisation des données hydro-climatiques dans le bassin versant de l'oued de Srou | 134 |
| 1. | Comblement des lacunes des pluies par la méthode de régression linéaire | 134 |
| 2. | Vérification de l'homogénéisation externe des stations hydro-climatiques | 137 |
| 2.1. | Application de la méthode des doubles Cumuls..... | 137 |
| 2.2. | Application de la méthode de la vecteur régional (MVR) sur les données pluviométriques (1976-2016)..... | 139 |
| 3. | Vérification de l'homogénéisation interne des stations pluviométriques retenues par la méthode « Cusum » | 142 |
| | Chapitre 5 : Mise au point sur les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 145 |
| | Introduction du chapitre 5 | 146 |
| | Axe 11 : Analyse de la variabilité pluviométrique du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 147 |
| 1. | Pluviométrie à l'échelle annuelle | 147 |
| 1.1. | Spatialisation des pluies annuelles (1976-2016) | 148 |
| 1.2. | Analyse de la variabilité interannuelle de la pluviométrie | 156 |
| 1.3. | Etude fréquentielle de la pluviométrie annuelle dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) 160 | |
| 2. | Mise au point sur l'analyse de la pluviométrie à l'échelle mensuelle | 163 |
| 2.1. | Spatialisation des pluies mensuelle dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) 163 | |
| 2.2. | Zoom sur le régime pluviométrique du bassin versant de l'oued de Srou..... | 165 |
| 3. | Analyse des apports pluviométriques journalières du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 166 |
| 3.1. | Extraction des nombres de jours pluvieux et non pluvieux..... | 167 |
| 3.2. | Etude de l'intensité des pluies journalières | 168 |
| 3.3. | Quantification des pluies journalières dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) 169 | |
| 3.4. | Nombre des jours pluvieux par mois..... | 169 |
| | Axe 12 : Température et Évapotranspiration dans le bassin versant e l'oued de Srou (1986-2016). | 171 |
| 1. | Température dans le bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016)..... | 171 |
| 1.1. | Variation inter annuelle de la température | 171 |
| 1.2. | Régime et variabilité mensuelle des températures dans le bassin de Srou (1986-2016) | 173 |
| 2. | ETP dans le bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016)..... | 175 |
| 2.1. | Formules de calcul de l'ETP | 175 |

| | |
|--|-----|
| 2.2. Variation de l’ETP dans le bassin versant de l’oued de Srou..... | 177 |
| Axe 13 : Zoom sur le bilan hydrique du bassin versant de l’oued de Srou (1986-2016) | 180 |
| Conclusion du chapitre 5 | 182 |
| Chapitre 6 : Le fonctionnement hydrologique dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016) | 183 |
| Introduction du chapitre 6 | 184 |
| Axe 14 : Analyse des modalités des écoulements dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)..... | 185 |
| 1. Variabilité annuelle des débits annuels dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016) | 185 |
| 1.1. Quantification de l’irrégularité des écoulements..... | 186 |
| 1.2. Etude fréquentielle des écoulements | 189 |
| 2. Régime d’écoulement du bassin versant de l’oued Srou | 190 |
| 3. Analyse des débits journaliers dans le bassin du Srou (1976-2016) | 192 |
| 3.1. Débits moyens journaliers | 192 |
| 3.2. Débits classés du bassin versant de l’oued de Srou..... | 193 |
| 3.3. Fréquence des débits journaliers | 194 |
| 3.4. Analyse des débits minimaux journaliers..... | 194 |
| Axe 15 : Mise au point sur la relation pluie débit dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016) | 197 |
| 1. Relation pluie-débit à l’échelle annuelle dans le bassin versant de l’oued de Srou | 197 |
| 1.1. Quotient et déficit d’écoulement | 199 |
| 1.2. Corrélation entre les pluies et les débits des stations du bassin versant de l’oued de Srou . | 199 |
| 2. Relation pluies débits à l’échelle mensuelles dans le bassin versant de l’oued de Srou | 200 |
| Conclusion du chapitre 6..... | 202 |
| Conclusion de la deuxième partie..... | 203 |
| Partie 3 : Détermination et identification des étiages dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2019)..... | 204 |
| Introduction de la troisième partie..... | 205 |
| Chapitre 7 : Détermination et analyse des débits d’étiages dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)..... | 206 |
| Introduction du chapitre 7 | 207 |
| Axe 16 : Détermination et analyse des étiages à l’échelle mensuelle à partir des QMNA (1976-2016) | 209 |
| 1. Définition et méthode | 209 |
| 2. Résultats et interprétations | 210 |
| 2.1. Quand les étiages du bassin versant de l’oued de Srou apparaissent-ils ?..... | 210 |
| 2.2. Variation des QMNA dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)..... | 211 |
| 2.3. Traitement des QMNA par la méthode Cusum | 212 |
| 2.4. Analyse fréquentielle des QMNA du bassin versant de l’oued de Srou..... | 214 |
| 2.5. Indice de sévérité d’étiage | 215 |

| | |
|---|-----|
| 2.6. Apport des QMNA pour les gestionnaires | 216 |
| Axe 17 : Détermination et analyse des étiages à l'échelle journalière à partir des VCN (1976-2016) | 218 |
| 1. Définition et méthodes | 218 |
| 2. Résultats et interprétations | 219 |
| 2.1. Choix des VCNd représentatifs des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 222 |
| 2.2. Occurrence des VCNd dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 224 |
| 2.3. Analyse de la variabilité des VCNd dans le bassin versant de l'oued de Srou | 224 |
| 2.4. Analyses des rangs des VCNd..... | 225 |
| 2.5. Analyse fréquentielle des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou | 228 |
| 2.6. Utilité des VCNd pour les gestionnaires | 230 |
| Axe 18 : Comparaison entre les VCN30 et les QMNA du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 231 |
| 1. QMNA et VCN30 proches mais pas identique dans le temps..... | 231 |
| 2. Variabilité annuelle des QMNA et des VCN30 dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 232 |
| 3. Corrélation entre les VCN30 et les QMNA du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) 233 | 233 |
| Axe 19 : Les DC comme outil de caractérisation des débits d'étiages à l'échelle journalière. | 235 |
| 1. Définition..... | 235 |
| 2. Méthodes de construction de la courbe des DC | 235 |
| 3. Domaine d'utilisation des DC | 238 |
| 4. Résultats et interprétations | 240 |
| 4.1. DC du bassin versant de l'oued de Srou issu de la méthode globale sur la longue période | 240 |
| 4.2. DC issus de la méthode de la moyenne des courbes annuelles. | 242 |
| 4.3. Analyse fréquentielle des débits classés annuels du bassin versant de l'oued de Srou | 243 |
| 4.4. Utilité des DC pour les gestionnaires | 246 |
| Conclusion du chapitre 7 :..... | 248 |
| Chapitre 8 : Les tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) : extraction et analyse | 249 |
| Introduction du chapitre 8 | 250 |
| Axe 20 : Extraction des phases de tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 252 |
| 1. Critère du choix de la méthode d'extraction des phases de tarissement..... | 252 |
| 2. Méthodologique..... | 252 |
| 3. Résultats et interprétations | 256 |
| Axe 21 : Analyse de la variabilité des coefficients de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 262 |
| 1. Cadre théorique et méthodologique..... | 262 |
| 2. Analyse statistique des coefficients de tarissement..... | 265 |
| Axe 22 : Ecoulement de base du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 270 |

| | |
|---|-----|
| 1. Cadre méthodologique | 270 |
| 2. Résultats et interprétations | 271 |
| Conclusion du chapitre 8 : | 274 |
| Chapitre 9 : Les étiages et sa gestion dans le bassin versant de l'oued de Srou : réglementations, seuils et sévérité..... | 275 |
| Introduction du chapitre 9 | 276 |
| Axe 23 : Cadre réglementaire et insuffisance des politiques de gestion des étiages au Maroc..... | 277 |
| 1. Gestion des ressources en eau au Maroc | 277 |
| 2. Réglementations et gestion des étiages dans le monde | 281 |
| Axe 24 : Débits limites et seuils d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou | 285 |
| 1. Débits limites d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 285 |
| 2. Définition des seuils d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 291 |
| Axe 25 : Identification des étiages sévères en fonction des durées et des volumes déficitaires dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 298 |
| 1. Dépassement des seuils d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou pour la période 1976-2016..... | 298 |
| 2. Identification du périodes déficitaires et quantification du déficit par la méthode SPA | 299 |
| 2.1. Méthodologie..... | 299 |
| 2.2. Résultats | 301 |
| Conclusion du chapitre 9..... | 303 |
| Chapitre 10 : Etiage et qualité des milieux naturels dans le bassin versant de l'oued de Srou : Suivi, mesure et analyse (2016-2019)..... | 304 |
| Introduction du chapitre 10 | 305 |
| Axe 26 : Quantification et organisation de la ressource en eau en période d'étiage (2016-2019) .. | 306 |
| 1. Objectifs du travail | 306 |
| 2. Cadre méthodologique | 306 |
| 2.1. Choix des points de mesure..... | 307 |
| 2.2. Installation des stations limnimétriques | 311 |
| 2.3. Méthode de jaugeage complètes avec le micro-moulinet..... | 311 |
| 2.4. Planning des campagnes de jaugeages | 315 |
| 3. Résultats et interprétations | 316 |
| 3.1. Création des courbes de tarages | 316 |
| 3.2. Régimes d'écoulements du bassin versant de l'oued de Srou et de ses affluents (2017-2018) | 317 |
| 3.3. Profils hydrologiques de l'oued de Srou (2016-2019)..... | 319 |
| 3.4. Le rendement hydrologique du bassin versant de l'oued de Srou et de ses affluents..... | 321 |
| 3.5. Coefficients de tarissement du bassin versant de l'oued de Srou et de ses bassins unitaires | 323 |
| Axe 27 : Impact des étiages sur la qualité du milieu naturels dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)..... | 326 |
| 1. Evolution de la qualité physique des eaux de surface du bassin versant de l'oued de Srou.... | 326 |

| | | |
|------|---|-----|
| 1.1. | Grille générale de la qualité des eaux de surface..... | 327 |
| 1.2. | Variation de la température dans le bassin versant de l'oued de Srou et ses affluents (2017-2018) | 329 |
| 1.3. | Variation du pH dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018) | 330 |
| 1.4. | Evolution de la conductivité électrique dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018) | 331 |
| 1.5. | Variation de l'oxygène dissous dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)..... | 332 |
| 2. | Identification des sources de pollution dans le bassin versant de l'oued de Srou | 333 |
| 3. | Etiages et l'accumulation des embâcles | 335 |
| | Conclusion du chapitre..... | 337 |
| | Conclusion de la troisième partie | 338 |
| | Conclusion générale | 340 |
| | Bibliographie..... | 345 |
| | Annexe | 360 |
| | Liste des figures..... | 367 |
| | Liste des Tableaux..... | 374 |

Liste des abréviations

| | |
|------------------------|--|
| PIB | Produit intérieur brut |
| QMNA, | Débit mensuel minimal annuel. |
| VCN_d | Volume moyen minimal de l'année pendant « d » jours consécutifs. |
| DC | Débits issus de la courbe des débits classés. |
| ABHOER | L'agence Hydraulique du Bassin de l'Oum-Er-Rbia |
| DPA | Direction provinciale de l'agriculture |
| HCP | Le haut-commissariat au plan |
| MNT | Modèle Numérique de Terrain |
| SIG | Système d'information géographique |
| LN | Log-normale |
| CDC | Courbe des débits classés |
| ARHMA | Annuaire du Réseau Hydrométrique du ministère de l'Agriculture |
| MAM_d | Mean Annual d-day Minimum flow |
| CEMAGREF | Centre d'Étude du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts |
| MINAN | Le débit minimum annuel |
| DCE | Le débit caractéristique d'étiage |
| OER | L'Oum-Er-Rbia |
| AEPI | Alimentation en eau potable et industrielle |
| ORSTOM | Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer |
| SBV | Sous bassin versant |
| BV | Bassin versant |
| CCDRF | Centre de la Conservation et du Développement des Ressources Forestières |
| ABHS | L'agence du bassin hydraulique du Sebou |
| ABHM | L'agence du bassin hydraulique de la Moulouya |
| SMN | Service de la météo nationale |
| CT | Les centres de travaux de l'office de la mise en valeur agricole |
| MVR | Méthode du vecteur régional |
| IRD | L'Institut de recherche pour le développement |
| CUSUM | Cumul Sum |
| CV | Coefficient de variation |
| CMP | Le coefficient mensuel pluviométrique |
| NJP | Nombre des jours pluvieux |
| CMT | Coefficient mensuel de la température |
| ETP | Evapotranspiration |
| CMD | Coefficients mensuels de débit |
| μ | Moyenne |
| σ | Ecart type |
| C.H | Coefficient d'hydraulicité |
| DE | Déficit d'écoulement |
| ISE | L'indice de sévérité d'étiage |
| Q_{min} | Le débit minimal annuel |
| EA | Etiage absolu |

| | |
|--------------|--|
| CEGUM | Le Centre d'études géographiques de l'Université de Metz |
| SPS | Seuil de Précipitations Significatives |
| DMP | Durée Minimum de la Phase de tarissement |
| TR | Temps de Ressuyage |
| IEB | L'indice de débit de base |
| QMA | Le débit annuel moyen |
| LEMA | La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques |
| SDAGE | Schémas directeurs d'aménagement et de gestion de l'eau |
| ONEMA | Office national de l'eau et des milieux aquatiques |
| WMO | World meteorological organization |
| SPA | Sequent peak algorithm |

Introduction générale

Introduction

La pénurie en eau douce est visible, dans de nombreuses régions de la planète (HAUDRET, 2008). À cette menace, s'ajoute l'impact de l'augmentation de l'activité anthropique et l'effet des changements climatiques. Le bassin Méditerranéen, région pauvre en eau, connaît déjà une surexploitation de cette ressource, qui le classe parmi les zones les plus affectées par le risque de pénurie. Ce phénomène touche plus particulièrement les pays du Sud, qui ne sont dotés que de 13% du volume total des ressources méditerranéennes en eau, estimé à un milliard de mètres cubes par an, mais dont la moitié seulement est exploitable (MARGAT, 2008).

Le Maroc est caractérisé par un climat propre à tous les pays du bassin méditerranéen, pluvieux et souvent doux en hiver (perturbations d'Ouest) et chaud et sec en été (hautes pressions tropicales) (BELTRANDO ET AL, 1995). Cette situation est due à la confluence de l'océan Atlantique et de la mer Méditerranée. Ce climat se caractérise par une diversité bioclimatique remarquable : méditerranéen au Nord, océanique à l'Ouest, continental à l'intérieur, subsaharien et saharien au Sud.

Il est remarquable que les précipitations ne se réalisent plus forcément que pendant la saison d'hiver, mais, elles ont tendance à s'installer pendant les saisons intermédiaires, surtout en automne, même chose pour le régime thermique, d'où l'installation des vagues de chaleur en dehors de leur saison habituelle (KARROUK, 2009). Mais, d'une façon globale, il n'est pas rare de trouver des années pour lesquelles les précipitations présentent un total relativement déficitaire, ce qui entraîne une période de sécheresse, avec une variation temporelle et spatiale dans le pays.

Ainsi, le Maroc connu plusieurs sécheresses dont une dizaine a concerné la majeure partie du Maroc. D'après le ministre délégué chargé de l'eau, les épisodes les plus remarquables sont : 1944-1945, 1980-1985, 1991-1995, 1998-2002 et 2006-2008, avec une durée pouvant atteindre cinq années successives, constituant ainsi, les sécheresses les plus sévères et les plus longues jamais observées, depuis que des observations météorologiques et hydrologiques sont effectuées. De plus, les sécheresses répétées de ces dernières décennies, les prévisions des modèles climatiques indiquant un réchauffement planétaire, affectant plus spécifiquement la Méditerranée du sud et de l'Est (BOULET, 2010), laissent penser que le déficit pluviométrique est une donnée structurelle au Maroc. Ces épisodes entraînent des conséquences néfastes, telles que la réduction des allocations d'eau potable, agricole et industrielle (due au déficit hydrique), ou encore, l'impact sur le développement socio-économique.

Lors de ces périodes de sécheresse, le Maroc est à chaque fois confronté à des périodes d'étéages sévères, marquées par la diminution voire des assèchements de nombreux cours d'eau. Cette situation s'aggrave pendant la période estivale et s'accroît encore davantage, avec les prélèvements des différents utilisateurs de l'eau superficielle et souterraine (agriculture notamment, eau potable ou industrie).

Si l'étéage se présente comme un événement saisonnier, plus ou moins sévère, plus ou moins long, qui concerne tous les cours d'eau (SMAKHTIN, 2001) et qui survient en général pendant la période des basses eaux estivales, ce n'est que récemment que les hydrologues se sont attachés aux étéages, alors que les crues constituent depuis longtemps, le thème majeur de leurs recherches (LANG, 2007).

Le défi que constitue l'irrégularité spatiotemporelle de la pluviométrie et des ressources en eau a imposé depuis longtemps aux gestionnaires marocains, de réaliser de grands ouvrages hydrauliques, pour stocker et transférer les apports des années humides au profit de leur utilisation pendant les années sèches. Mais, une gestion adéquate, nécessite une connaissance approfondie de la ressource en eau disponible, surtout en périodes d'étéages et notamment, dans le contexte du changement climatique actuel et d'augmentation continue des prélèvements en eau.

Plusieurs études et projets ont vu le jour et ont conclu que les étéages constituent des événements souvent difficiles à analyser et à prévoir. En effet différents indices existent pour décrire l'étéage (SMAKHTIN, 2001 ; HISDAL ET TALLAKSEN, 2004 ; WMO, 2008) et servent de seuils pour le développement de différentes règles de gestion de la ressource en eau, entraînant par exemple, la limitation des prélèvements.

À l'échelle du bassin versant de l'oued de l'OER, deuxième grand bassin du pays qui concentre la plus large demande en eau (4,25 milliards de mètres cubes, soit 35% de la demande totale en eau du Maroc), la situation devient de plus en plus critique, pendant les périodes d'étéage. En effet, ces eaux connaissent une large demande et assurent plus de 50 % des besoins en eau potable du grand Casablanca (métropole et capitale économique du Maroc abritant quatre millions d'habitants). Ce bassin est aussi la région la plus agricole du Maroc, non seulement sa superficie est élevée (plus de 27% de la surface agricole utile irriguée du Maroc soit 493.600 ha dont 323.000 ha en Grande Hydraulique), mais aussi la consommation par hectare est une des plus élevées au Maroc, ainsi que, la concentration des grandes unités des industries minières (OCP) et agroalimentaires (Sucreries, laitières...) (JALLOULI, 2013). Ces secteurs constituent les facteurs clés, responsables de la diminution des ressources en eau et de la dégradation de la qualité de l'environnement du bassin versant de l'Oum-Er-Rbia. Cette large

demande nécessite d'adopter des systèmes de contrôle et de quantification du disponible, surtout en périodes d'étiage. Donc, il est important de déterminer les débits d'étiage du bassin, ainsi que de ses sous bassins.

De ce fait, nous voulons par cette étude, approfondir la connaissance des événements d'étiage dans le premier affluent du bassin de l'oued Oum-Er-Rbia situé dans le Moyen-Atlas central moins anthropisé. Il s'agit du bassin versant de l'oued de Srou. L'objectif principal est de tester les différentes méthodes d'identification des débits d'étiage, les périodes de retours et avoir une bonne connaissance du fonctionnement des principaux aquifères de la région, afin de suggérer aux gestionnaires des seuils des débits d'étiage.

I. Motivations de la thèse

Les motivations qui nous ont poussé à choisir ce sujet, sont de deux sortes, personnelles et scientifiques :

1. Motivations personnelles

Comme ancien lauréat de la FST de Béni Mellal et titulaire d'une licence en aménagement et gestion de l'environnement, la protection et la gestion durable des ressources naturelles et en particulier, les ressources en eau est devenue pour nous, non pas une préoccupation, mais un mode de vie. Au cours des années de notre formation en Master « Géo-environnement, paysages et Risques », nous avons réalisé un projet de fin d'étude intitulé : « impact des activités anthropiques sur les ressources en eau, dans le bassin versant supérieur de l'Oum-Er-Rbia », par lequel, nous avons approfondi nos connaissances en termes de ressources en eau, et nous avons augmenté notre degré de conscience envers la problématique de la pénurie en eau. Après quoi, nous avons eu la volonté de couronner ce parcours sur l' « eau » avec une thèse, à travers laquelle nous valorisons nos connaissances et nos expériences acquises auparavant, surtout dans le domaine de l'hydrologie extrême (étiage).

2. Motivations scientifiques

Partant de ce que nous vivons actuellement à savoir les changements climatiques, la mal répartition spatio-temporelle des précipitations et les sévères sécheresses hydrologiques, la proposition de solutions, pour une gestion intégrée des étiages est devenue une préoccupation majeure. En effet, les étiages font l'objet d'une attention toute particulière par les scientifiques, ainsi que pour les gestionnaires, afin de les gérer le mieux possible.

Les Oueds du Maroc souffrent énormément de ce phénomène, qui s'aggrave tous les ans, avec la succession des années sèches. Cette situation pose de nombreux problèmes, associés à la gestion de la ressource en eaux. L'Oued de Srou constitue un important affluent de l'Oued Oum-Er-Rbia, en amont du barrage d'Ahmed Elhansali. Ce dernier assure l'alimentation en eau d'irrigation pour la grande plaine du Tadla, l'alimentation en eau potable, l'industrie minière et la production d'électricité pour les villes et les centres du plein. Pendant les années de sécheresses le barrage devient incapable de satisfaire les besoins cités auparavant. Ce qui oblige, par la suite, les gestionnaires à couper l'écoulement de l'oued Oum-Er-Rbia en aval, ce qui provoque la dégradation de la vie aquatique.

A partir de ces cas, nous avons choisi d'étudier les débits d'étiages dans le bassin du Srou, pour définir des débits-seuils d'étiages, dans le but de garantir dans l'avenir les besoins, sans menacer la vie aquatique.

II. Présentation du bassin versant de l'oued Srou

Le bassin de Srou, objet de ce travail, constitue le premier affluent de l'Oued Oum-Er-Rbia dans le Moyen-Atlas central. Il s'étend sur une superficie de 1374 km², à la station hydrométrique de Chacha N'mallah. Il est localisé au Nord-Ouest du Moyen-Atlas central. Il se situe entre la longitude 5°6' et 6°50' Ouest et la latitude 38° 4' et 39°1' Nord (Figure 1). Administrativement, le bassin de l'oued de Srou s'étale sur la province de Khénifra et une petite partie de la province d'Ifrane. Il est limité à l'Ouest par le massif hercynien du plateau central, au Nord par le Causse Moyen-Atlasique et au Sud-Est par la Meseta Maroco-oranaise. Il présente un caractère montagneux : l'altitude varie entre 700 m et 2400 m. Il montre aussi une diversité sur le plan du relief, avec des formes structurales diversifiées. Le sens d'écoulement du cours d'eau principal est du Nord-Est vers le Sud-Ouest. Hydrologiquement, le bassin versant de l'oued de Srou se compose de deux sous bassins majeurs :

- Le sous bassin de Chbouka ;
- Le sous bassin de Srou, en amont de la confluence avec l'oued de Chbouka.

L'oued Srou rejoint l'Oued OER, en amont du barrage d'Ahmed Elhansali, à environ 12 km de la ville de Zaouit Echeikh.

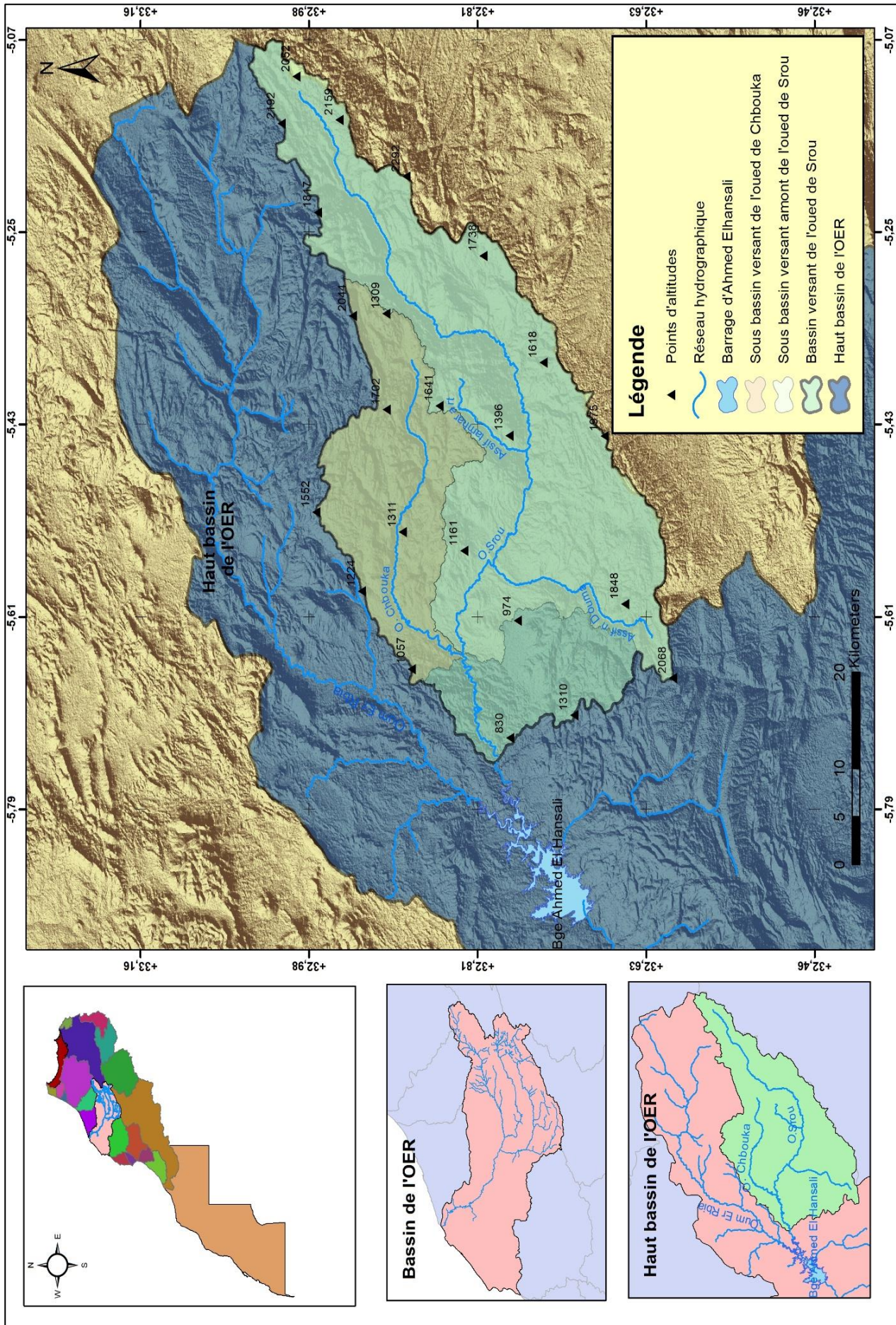


Figure III: Situation géographique du bassin versant du haut OER et du bassin versant de l'oued de Srou

III. Problématique de l'étude

L'eau représente le pilier majeur, pour l'économie marocaine. Une étroite relation existe entre l'abondance des précipitations, le PIB et le PIB agricole. L'irrégularité spatio-temporelle qui marque le climat semi-aride du pays et les longues phases de sécheresses observées depuis le début des années 80, limitent le développement socio-économique. Ainsi, le volume d'eau par habitant, qui exprime la richesse ou la rareté relative de l'eau d'un pays, montre que le Maroc est au seuil critique ($1000 \text{ m}^3/\text{habitant}$) (RAPPORT SUR LE DEVELOPPEMENT DANS LE MONDE, 2010). En raison d'une utilisation et d'une gestion peu rationnelles du potentiel hydrique de ces ressources, la disponibilité en eau va connaître une diminution de plus en plus accrue dans les prochaines années. La situation s'aggrave davantage en périodes d'étiages, et la population se trouve confronter à un assèchement des cours d'eau et à une diminution dans l'apport des sources.

Les politiques de gestions traditionnelles, basées sur l'augmentation de l'offre pour répondre à la demande croissante ont trouvé leurs limites et se heurtent à des obstacles économiques, sociaux et écologiques croissants. La proposition d'une gestion basée sur la connaissance approfondie du disponible en périodes d'étiage, doit être l'une des préoccupations majeures des scientifiques et des décideurs. À cet égard, un des objectifs majeurs énoncés par le Plan Bleu « améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau, pour faire face aux pénuries d'eau en méditerranée » (PLAN BLEU, SOPHIA-ANTIPOLIS, 2006) est de « promouvoir la gestion intégrée des bassins versants, incluant les eaux de surface et souterraines... ».

L'étiage est donc une préoccupation pour de nombreux pays, à travers le problème d'une meilleure gestion de la ressource en eau et une meilleure compréhension des processus qui influent sur ce phénomène et leurs évolutions, notamment, dans le contexte du changement climatique actuel et d'augmentation continue des prélèvements en eau.

Notre thèse s'inscrit tout à fait dans cette problématique, d'autant plus qu'elle s'applique au bassin de l'Oum-Er-Rbia (33.520 km^2) qui abrite 16 % de la population marocaine et dispose de 25% des ressources en eau qui sont principalement des eaux de surface (90%) renouvelables du Maroc. Le bassin de l'oued de l'Oum-Er-Rbia, a connu depuis l'âge des temps, un afflux des populations qui développent autour de la rivière, toutes les activités possibles, leur permettant d'assurer une qualité de vie acceptable. Il a suscité l'attention des aménageurs depuis 1929, avec la réalisation de 22 barrages, dont 5 structurants. La capacité de stockage totale atteinte actuellement est de 5410 Mm^3 (ABHOER). Ses ouvrages alimentent en eau potable d'importantes agglomérations (Khénifra, Béni-Mellal, Marrakech, Casablanca, etc.) et

d'importants périmètres agricoles irrigués (Tadla, Tassaout et Doukkala). Le haut bassin, en amont du barrage Ahmed Elhansali, est considéré comme le château d'eau pour la totalité du bassin, comme le souligne JEAN LOUP (1962). Le bassin de l'oued Srou, affluent de l'oued Oum-Er-Rbia dans cette partie, est connu par la salinité de ses eaux, ce qui fait de lui un bassin peu anthropisé. L'oued Srou participe aussi avec une part importante, dans le remplissage du barrage Ahmed Elhansali. Ce dernier assure l'eau d'irrigation pour le périmètre de Béni Amir, l'eau pour l'industrie minière (OCP) et l'approvisionnement en eau potable. Dernièrement, le barrage est devenu incapable de répondre, ni aux besoins de ces secteurs ni à garantir un écoulement biologique en aval, ce qui a menacé la vie aquatique, et a causé par la suite, une mortalité intense des poissons surtout en périodes d'étiage. De ce fait vient l'idée de la nécessité d'une quantification et une détermination des ressources en eaux disponibles dans les bassins qui alimentent le barrage en périodes de basses eaux, et en particulier, en périodes d'étiage.

Une préoccupation de notre étude est donc, l'étude et la quantification des débits d'étiages dans le bassin versant de l'oued Srou. Le choix de ce bassin versant est sorti d'une grande réflexion. Il s'agit d'un bassin peu anthropisé, dont les processus hydrologiques souterrains et de surface sont soumis à des variations spatio-temporelles, qui dépendent des entrées météorologiques et des caractéristiques physiographiques des terrains.

Une autre préoccupation de cette thèse, et qui fait partie de la problématique des étiages est de voir l'apport des nappes dans le soutien des débits d'étiages, lors des périodes de basses eaux.

IV. Objectifs de la thèse :

L'objectif de notre travail est de déterminer le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Srou, lors des périodes d'étiage. Il traite à la fois l'hydrologie extrême des « étiages » et les actions anthropiques. Le but est de comprendre le comportement de ces cours d'eau, pendant ces périodes. Nous analyserons donc ce phénomène, afin de comprendre sa genèse, sa fréquence d'apparition et ses conséquences sur le milieu. Dans le cadre de cette étude, plusieurs objectifs guideront l'analyse dont les principaux sont relatifs à :

- La quantification des entrées pluviométriques dans le bassin versant Srou, par différentes méthodes géométriques (spatialisations) et statistiques (moyenne, écart-type, coefficient de variation...);
- La détermination de la quantité d'eau perdue à l'échelle du bassin par évapotranspiration, dans le but de déterminer le bilan hydrologique ;

- La détermination des débits d'étiage, à plusieurs échelles temporelles (QMNA, VCN_d et DC) ;
- L'évaluation des situations d'étiage, en termes de durée ;
- La comparaison entre les différents indices, dans le but de déterminer les seuils réglementaires ;
- Mettre à la disposition des gestionnaires, des débits d'étiages ;
- Comprendre l'apport des nappes dans le soutien des débits d'étiage ;
- La vidange de la nappe, et son apport avec le cours d'eau ;
- La détermination des modalités de tarissement du bassin Srou, ainsi que la détermination du coefficient de tarissement et la puissance des aquifères ;
- La régionalisation des débits caractéristiques d'étiages et la caractérisation du rendement hydrologique dans les différents sous bassins, dans le but de déterminer la puissance des aquifères qui assurent l'alimentation du bassin Srou, par des campagnes de jaugeages ;
- L'identification de l'impact des étiages sur la société et la qualité des eaux du bassin de Srou.

V. Méthodes, approches et outils :

Chaque étude systématique, nécessite une méthode de travail qui lui est adéquate et qui permettra par la suite, de répondre aux différentes questions de la problématique. Afin d'atteindre les objectifs fixés et cités auparavant, la méthode adoptée sera basée sur une méthode géographique, avec deux moteurs hydrologiques : hydrologie quantitative et hydrologie qualitative. Ces approches sont inséparables, complémentaires, efficaces et permettent d'analyser la sévérité de l'étiage, sa durée et son évolution.

Une part importante de ce travail est basée sur l'analyse et la quantification de la ressource en eau dans le bassin versant de l'oued Srou, sur la base des données mesurées sur le terrain, ou collectées auprès des services de gestion des eaux.

1. Travail de terrain :

L'originalité d'un travail géographique est inspirée de l'originalité des données de terrain et des résultats que l'on peut en tirer. Le travail de terrain est organisé comme suit :

- *Campagnes de jaugeages :*

Premièrement, nous avons réalisé des mesures ponctuelles de débits en régime non directement influencés par les précipitations. Le but de cette étape est la focalisation de l'information hydrologique, généralement intégrée dans les relevés aux stations, et donc, d'avoir une "cartographie" plus fine de la ressource.



Mesure des débits de l'oued Srou (Août 2016)

Les campagnes se sont déroulées entre 2016 et 2019, avec une fréquence d'une campagne chaque mois en périodes estivale. On a commencé par : le choix des sites, l'installation des échelles lémnimétriques, le jaugeage en périodes non influencés par les précipitations est effectué par un micro-moulinet.

Organigramme des campagnes de jaugeages

| Année | Mois | Objectif de la campagne |
|-------|---|--|
| 2016 | Février | Diagnostic et choix des sous bassins avec écoulement permanent ainsi les sites de mesure |
| | Mai | Validation des choix et installation des échelles limnimétriques et campagnes de jaugeages |
| | Juin juillet août | Campagnes de jaugeages |
| 2017 | À partir du mois de juin 2017 jusqu'au mois de septembre 2018 | Campagnes de jaugeages chaque mois dans le but d'élaborer des courbes de tarages |
| 2018 | | |
| 2019 | Juin juillet août | Campagnes de jaugeages |

Le suivi des débits entre le mois de mai 2017 et le mois d'août 2018 nous a permis la construction et élaboration des courbes de tarages de l'ensemble des stations qui couvrent le domaine d'étude.

- *Suivi de la qualité physique des eaux de surface*

Les campagnes de mesure en étaient effectuées lors des campagnes de jaugeages entre septembre 2017 et août 2018. Les paramètres utilisés sont la température de l'eau, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité électrique. Ces paramètres sont mesurés sur place à l'aide d'un appareil spécial appelé pH-mètre/Conductimètre. On note que ces paramètres sont mesurés in situ.

L'objectif est de suivre l'évolution de ces paramètres en périodes des hautes eaux et des basses eaux, dans le but de déterminer l'impact des étiages sur la qualité des eaux de surface dans le bassin versant de l'oued de Srou. Les résultats d'analyses vont être comparés avec les normes de qualité nationales adoptées pour les eaux de surfaces.

Les résultats des campagnes de suivi de la qualité physique des eaux de l'oued de Srou et de ses affluents seront comparés à la grille d'évaluation de la qualité des eaux de surface de la SEEE. Le but est de déterminer le degré d'altération de ces eaux.

- *Enquête et questionnaire*

Dans le but de compléter cette étude, nous avons essayé de déterminer les perceptions de la population riverain du bassin versant de l'oued de Srou sur les étiages ainsi les impacts qui y sont liés à travers un questionnaire. Donc, l'objectif est reconstruit l'histoire hydrologique de

la zone et en particulier l'évolution, les caractéristiques et la sévérité des périodes d'étiages pour valider les résultats de l'analyse statistiques.

Nous avons réalisé un questionnaire regroupant 89 questions. Les questions ont concerné 9 thèmes sur l'évolution du climat du bassin et les perceptions de la population locale sur le thème des étiages (annexe). L'enquête s'est déroulée tout le long des campagnes et a concerné 113 habitants.

Pour faciliter le remplissage du questionnaire, l'interprétation et l'analyse, nous avons utilisé la plateforme « google forms ». Cette dernière facilite la collecte de l'information et donne des résultats rapides et bien organisés sous formes des tableau Excel et des graphes.

Le choix des participants s'est basé sur la répartition dans le bassin (amont, milieu et aval), l'âge pour reconstruire l'histoire de la région ainsi leur disponibilité lors de nos visites sur le terrain. Le questionnaire a été rempli d'une façon automatique in situ lors d'un entretien particulier avec le participant pour s'assurer de sa bonne compréhension des questions.

2. Analyses statistiques

Dans le but de déterminer la variabilité des conditions hydro-climatiques dans le bassin versant de l'oued de Srou, nous allons mener à plusieurs méthodes et tests statistiques (moyenne, écart type, coefficient de variation, tendance...), sur différents pas de temps. Nous allons effectuer :

- Une analyse de la pluviométrie à l'échelle : annuelle, mensuelle et journalière pour deux chroniques (1976-2016) et (1986-2016) ;
- Une analyse de la température à l'échelle : annuelle et mensuelle pour la chronique (1986-2016) ;
- Une analyse de l'évapotranspiration à l'échelle : annuelle et mensuelle pour la chronique (1986-2016)
- Une analyse des débits à l'échelle : annuelle, mensuelle et journalière pour la chronique (1976-2019)
- Une analyse des débits d'étiages par l'utilisation des différents indicateurs (1976-2019) ;
- Une analyse de la qualité physique des eaux de surface dans le bassin versant de l'oued de Srou entre 2017 et 2018.

3. Outils utilisés

Le traitement statistique des données hydro-climatiques et des événements d'étiages s'est basé sur des logiciels généralistes comme « Excel » en particulier l'application « xlStat ». Nous avons aussi utilisé des outils plus spécifiques en hydrologie, tels « Hydraces », « Khronostat » pour l'analyse des séries, « Hyfran » pour l'étude fréquentielle et « Depjau » pour le dépouillement des jaugeages et l'estimation des débits.

Les traitements de données impliquant l'analyse spatiale des facteurs et variables intervenant dans la dynamique des écoulements s'est fait dans le logiciel ArcGis™. Les cartes présentées dans le présent document sont produites à partir de ce logiciel.

VI. Données utilisées

Pour mener à bien cette étude, nous avons utilisé plusieurs types de données. Elle concerne les variables mesurées qu'elles soient hydrologiques, météorologiques, et celles des recensements de population par exemple.

Un grand problème nous a rencontrés durant cette phase, l'accès à la donnée a pu s'apparenter à une véritable quête tant celle-ci « a du mal à sortir des administrations ». Mais finalement avec l'utilisation des chemins détournés parfois, nous sommes parvenus à réunir des chroniques de données le plus souvent complètes et cohérentes dans l'ensemble. Ces données peuvent être présentées comme suit :

1. Données cartographiques

Nous avons basé sur un ensemble de cartes de différents types, on note :

- Les cartes topographiques à l'échelle 1/50000, couvrant la totalité du bassin versant. Elles sont au nombre de six cartes topographiques d'échelle 1/50000 qui couvrent le bassin (Timahdite, Itzer, Kerrouchan, Aghbalou_N_Serdane, Elkhab et Khénifra). Ces cartes ont été utilisées pour une délimitation rigoureuse du bassin versant et la digitalisation du réseau hydrographique.
- La carte géologique (feuille de Rabat) au 1/50000, ont été utilisées pour caractériser la géologie du bassin versant (lithologie et tectonique) pour en déduire le degré de perméabilité du substratum.
- Les Modèles numériques de terrain MNT du Maroc central tiré du site : earthexplorer.usgs.gov a une résolution de 30 m, reçus le 10 avril 2016.

2. Données climatiques

Le climat est un facteur important qui influence d'une manière directe les ressources en eau et le fonctionnement hydrologique, C'est pourquoi on a travaillé sur les stations pluviométriques, thermométriques et hydrométriques suivantes :

- *Stations pluviométriques*

L'ensemble des stations utilisées dans la présente étude est partagé entre différentes administrations ; l'agence du bassin hydraulique de l'Oum-Er-Rbia (ABHOER), l'agence du bassin hydraulique de la Sebou (ABHS), l'agence du bassin hydraulique de la Melouya (ABHM), le service de la météo nationale (SMN) et les centres des travaux de l'office de la mise en valeur agricole (CT). Les stations choisies sont au nombre de 16 stations dont 6 sont à l'intérieur du bassin versant.

- *Stations thermométriques*

Les températures sont mesurées dans deux stations : station de Taghat et la station d'Ahmed Elhansali

- *Stations hydrométriques*

L'analyse hydrométrique va se baser sur les données des deux stations du bassin : la station d'Aval Elhri et la station de Chacha N'mallah

3. Données collectées du terrain

Il s'agit des

- Données des débits enregistrés pendant les campagnes de mesures, qui sont déroulés entre 2016 et 2019 ;
- Des résultats de mesure de la qualité physique des eaux de surface, qui sont déroulés entre 2017 et 2018 ;
- Les résultats du questionnaire

4. Données du haut-commissariat au plan

On a utilisé les données statistiques du Haut-Commissariat au Plan (HCP) surtout les données des recensements de 1994, 2004 et 2014.

VII. Structure de la thèse

Pour bien cerner l'étude des étiages et les tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou, nous avons divisé cette étude en trois grandes parties, elles sont organisées comme suit :

➤ **Partie 1 :** cette partie est destinée à la présentation des caractéristiques naturelle et humaines du bassin versant de l'oued de Srou ainsi la détermination des enjeux et la définition des étiages hydrologiques. Cette partie est divisée en trois chapitres :

- **Chapitre 1 :** est consacré à la présentation des aspects physiques du bassin versant de l'oued de Srou. Il traitera les paramètres morphométriques du bassin versant, et le contexte morpho structural. Il s'agit des composants clés qui contrôlent les potentialités en eau et les conditions d'écoulement du bassin étudié. Nous avons choisi comme exutoire pour le bassin versant de l'oued de Srou, la station hydrométrique de Chacha N'mallah afin de mieux cerner les conditions d'écoulement et de mieux juger les rôles de chaque paramètre morphométrique.
- **Chapitre 2 :** dans ce chapitre nous allons étudier le contexte sociologique et démographique du bassin versant de l'oued de Srou et les mutations profondes qui sont liées à la croissance démographique. Nous allons aussi traiter les potentialités économiques du bassin ainsi leurs impacts sur la ressource en eau.
- **Chapitre 3 :** Dans ce chapitre nous allons présenter l'état actuel de la ressource en eau au Maroc et dans le bassin versant de l'oued de l'Oum-Er-Rbia par rapport aux différentes menaces qui y sont exercées. Puis, nous allons s'intéresser aux définitions et concepts relatifs aux étiages et aux tarissements ainsi la présentation des différents méthodes et d'indices utilisés dans leurs caractérisations.

➤ **Partie 2 :** objectifs de cette étude est de zoomer sur les caractéristiques climatiques (pluviométrie, température et évapotranspiration) qui règnent dans le bassin versant de l'oued de Srou, sur différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle et journalière). Afin, de déterminer le fonctionnement hydrologique de l'oued de Srou et de son affluent, l'oued de Chbouka. Cette partie comprend quatre chapitres :

- **Chapitre 4 :** il concerne la présentation des stations hydro-climatiques, la critique et l'homogénéisation des données ; pluviométriques, thermométriques et hydrométriques et le comblement des lacunes. C'est une étape essentielle pour chaque étude de ce type car les données qu'on doit utiliser dans les traitements statistiques doivent être homogènes, fiables et exploitables.

- **Chapitre 5** : dédié à l'analyse des données pluviométriques annuelles, mensuelles et journalières, afin de déterminer la distribution spatiale de la pluviométrie et de définir les régions pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant pour la compréhension du régime hydrologique de l'oued de Srou et son affluent l'oued de Chbouka. Ainsi l'étude de la température et évaporation.
- **Chapitre 6** : traite le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'oued de Srou dans le but de comprendre leur régime.
- **Partie 3** : l'objectif est de déterminer les caractéristiques principales des étiages : débits, genèse, évolution et fréquence d'apparition. Les impacts de cet événement sur la dynamique fluviale, la qualité d'eau et les activités humains. Cette partie se compose de quatre chapitres :
 - **Chapitre 7** : L'objectif du présent chapitre est l'identification et la caractérisation des débits d'étiages dans un climat semi-aride.
 - **Chapitre 8** : Dans ce chapitre nous allons essayer d'analyser les tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou pour la période 1976-2016.
 - **Chapitre 9** : dans le cadre ce chapitre nous essayer de proposer des seuils de gestions et des limites d'utilisation. Ainsi une analyse de la sévérité des situations des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou sera réalisée.
 - **Chapitre 10** : Dans le présent chapitre, nous essayons de quantifier quantitativement et qualitativement la ressource en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou à une échelle plus fine par des campagnes de jaugeages et de suivi de la qualité des eaux de surface.

| | |
|---|---|
| <p>Partie 1 : Le bassin versant de l'oued de Srou : Présentation, anthropisation et enjeux des étiages hydrologiques</p> | <ul style="list-style-type: none">• Chapitre 1 : Caractéristiques générales du bassin versant de l'oued de Srou• Chapitre 2 : L'anthropisation et l'occupation du sol dans le bassin versant de l'oued de Srou• Chapitre 3 : Le problème croissant de la ressource en eau, cadre théorique et méthodologique des étiages hydrologiques |
| <p>Partie 2 : Le fonctionnement hydro-climatique du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)</p> | <ul style="list-style-type: none">• Chapitre 4 : Présentation des stations et critique des données• Chapitre 5 : Les apports au système hydrologique dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)• Chapitre 6 : Organisation des écoulements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) |
| <p>Partie 3 : Détermination et identification des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2019)</p> | <ul style="list-style-type: none">• Chapitre 7 : Détermination et analyse des débits d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)• Chapitre 8 : Les tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) : extraction et analyse• Chapitre 9 : Cadre réglementaire et propositions des seuils d'étiages• Chapitre 10 : Quantification de la ressource en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou en périodes d'étiage et identification de leurs impacts (2016-2019) |

Structure de la thèse

Partie 1 : Le bassin versant de l'oued de Srou : Présentation, anthropisation et enjeux des étiages hydrologiques

Introduction de la première partie

Chapitre 1 : Caractéristiques générales du bassin versant de l'oued de Srou

Chapitre 2: Anthropisation et occupation du sol dans le bassin versant de l'oued de Srou

Chapitre 3 : Problème croissant de la ressource en eau, cadre théorique et méthodologique des étiages hydrologiques

Conclusion de la première partie

Introduction de la première partie

La gestion de la ressource en eau est l'une des grandes problématiques du 21^e siècle. De nombreux phénomènes, naturels ou anthropiques, viennent influencer les ressources et plus particulièrement sur le cycle de l'eau. Parmi eux, l'étiage est probablement l'un des plus importants événements affectant la ressource en eau. Ce terme est cependant difficilement définissable.

Dans le premier chapitre, nous étudierons les différentes caractéristiques physiques du domaine d'étude, le bassin versant de l'oued Srou. Nous allons étudier les grandes unités de relief que marque le bassin et leurs caractéristiques morphologiques ainsi que leurs répartitions spatiales. Par la suite nous allons calculer et analyser les différents paramètres physiographiques du bassin versant, à savoir les paramètres morphométriques, topographiques et hydrographiques. Nous allons essayer d'identifier les grands aspects structuraux du bassin de l'oued de Srou, en nous focalisant sur leur répartition spatiale et leur apport dans la mobilité des ressources en eau. Par la suite, nous allons exploiter ces différentes caractéristiques lithologiques et structurales pour en déduire le comportement du substratum à l'échelle du bassin dans le but d'estimer le degré de la perméabilité.

Dans le deuxième chapitre de cette partie, nous allons étudier les conditions anthropiques et on va décrire l'occupation du sol dans la zone d'étude. Compte tenu de ses potentialités naturelles, le bassin versant de l'oued de Srou a vécu des mutations profondes liées à la croissance démographique et aux conditions politiques du Maroc. Ces mutations ont notamment concerné les activités humaines notamment la relation entre l'homme et la terre et l'eau. En dernier lieu, nous allons voir la répartition spatiale du couvert végétal en identifiant les différentes forêts et leurs principales essences forestières.

Dans le troisième chapitre, nous allons aborder en premier lieu la problématique de la ressource en eau au Maroc et dans le bassin versant de l'oued Oum-Er-Rbia, ainsi que les différentes difficultés qui menacent sa disponibilité, en particulier les événements des étiages. Puis, nous allons essayer d'exposer les définitions de cet événement et des tarissements. Cette étape permet également de définir les indices qui caractérisent l'étiage et le tarissement en plus des impacts de ce phénomène. Nous exposerons aussi les variables choisies pour l'analyse et la caractérisation des étiages des cours d'eau étudiés.

Chapitre 1 : Caractéristiques générales du bassin versant de l'oued de Srou

Introduction du chapitre 1

Axe 1 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued de Srou

Axe 2 : Hypsométrie et système de pente du bassin versant de l'oued de Srou

Axe 3 : Présentation et analyse du milieu naturel du bassin versant de l'oued de Srou

Conclusion du chapitre 1

Introduction du chapitre 1

Le bassin versant est considéré comme l'unité de base dans les études hydrologiques. Il s'agit de l'unité de gestion du territoire pertinent d'un point de vue hydrologique, écologique et géomorphologique (CHORLEY, 1969). C'est une unité complexe dont plusieurs paramètres, composantes naturelles et anthropiques régissent le cycle hydrologique. LOUP (1974) décrit le bassin versant de la manière suivante : « *La surface réceptrice des eaux qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe est le bassin versant. On le définit par sa morphométrie, ses caractères climatiques, sa géologie, sa végétation, ses sols.* » L'auteur intègre dans sa définition les eaux souterraines. ROCHE (1963) a expliqué qu'un bassin versant fonctionne comme un collecteur chargé de recueillir les pluies et de les transformer en écoulement à l'exutoire.

Ce chapitre est consacré à la présentation des aspects physiques du bassin versant de l'oued de Srou. Il traitera les paramètres morphométriques du bassin versant, et le contexte morpho structural. Il s'agit des composants clés qui contrôlent les potentialités en eau et les conditions d'écoulement du bassin étudié. Nous avons choisi comme exutoire pour le bassin versant de l'oued de Srou, la station hydrométrique de Chacha N'mallah afin de mieux cerner les conditions d'écoulement et de mieux juger les rôles de chaque paramètre morphométrique.

Dans le premier axe nous allons essayer d'écrire l'ensemble des paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued de Srou. Le deuxième axe sera consacré à l'étude des systèmes de pentes et des paramètres d'organisations des écoulements. Alors que dans le troisième axe nous allons essayer de déterminer le contexte naturel du bassin.

Axe 1 : Caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued de Srou

Pour caractériser la morphologie du bassin versant de l'oued Srou, nous avons étudié les indices les plus utilisés. Ces indices sont élaborés par les différents organismes intéressés à l'hydrologie, comme l'ORSTOM, et certains auteurs hydrologues. L'étude des caractéristiques de forme s'est basée sur les différentes cartes topographiques avec des échelles 1/50000 couvrant la totalité du bassin versant, ainsi que les Modèles Numériques de Terrain (MNT) téléchargeables à partir du site www.earthexplorer.usgs.gov.

La délimitation du bassin versant de l'oued de Srou ainsi que la digitalisation du réseau hydrographique ont été faites à partir des six cartes topographiques d'échelle 1/50000 qui couvrent le bassin (Timahdite, Itzer, Kerrouchan, Aghbalou_N_Serdane, Elkbab et Khénifra). Alors que les autres différentes caractéristiques de formes ont été extraites à partir des MNT d'une résolution de 30 m couvrant du Maroc central.

1. Superficie et périmètre du bassin

La superficie du bassin versant donne une première impression sur la quantité d'eau que le bassin versant peut recevoir et les volumes d'eau qui s'écoulent jusqu'à l'exutoire. Les débits vont donc être en partie reliés à sa surface (RIAD, 2003). Alors que le périmètre n'exerce aucune influence sur l'état d'écoulement des cours d'eau à l'échelle du bassin versant. Le bassin versant de l'oued de Srou est d'une superficie de 1374 km² à la station de Chacha N'mallah et d'un périmètre de 198 km.

Tableau 1-1 : Les superficies et les périmètres du bassin versant de l'oued de Srou ainsi ses principaux sous bassins

| Paramètres géométriques | Sous bassin de l'oued | | Bassin versant de l'oued Srou à la station de Chacha N'mallah |
|------------------------------------|-----------------------|------------|---|
| | Chbouka | Srou amont | |
| Superficie (km²) | 331 | 858 | 1374 |
| Périmètre (km) | 95 | 178 | 198 |

On note que la somme des superficies des deux sous bassins de l'oued de Srou est 1189 km². La superficie est inférieure à celle du bassin versant de l'oued de Srou à la station qui est 1374 km². Cette différence de 185 km² correspond à la partie qui existe après la confluence des deux sous bassins de l'oued de Chbouka et de Srou amont.

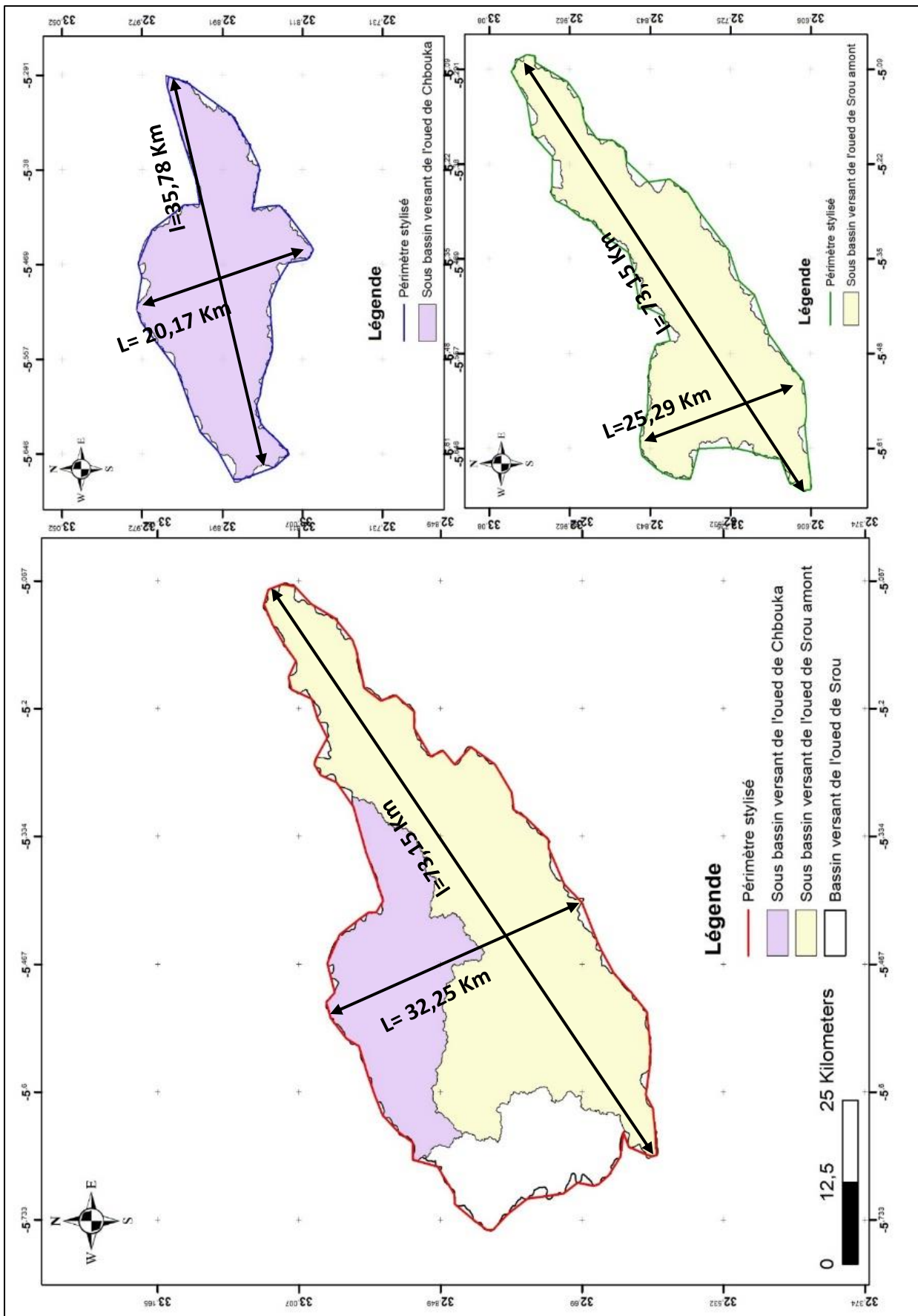


Figure 1-1 : Paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins (MNT 2016)

2. Indice de Gravélius (K_G)

Cet indice compare le périmètre (P) du bassin à celui d'un cercle ayant la même superficie S du bassin considéré. L'équation de cet indice est donnée par la formule suivante :

| | |
|--|---|
| $K_G = \frac{P}{\sqrt{2\pi S}} = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}}$ | Avec : <ul style="list-style-type: none"> - K_G : l'indice de compacité de Gravélius, - S : Superficie du bassin versant (km²), - P : le périmètre (km). |
|--|---|

On dit qu'un bassin versant est quasiment circulaire, quand il a un K_G égale à 1, et plus cette valeur est supérieure à 1, le bassin versant prend une forme plus allongée. Les valeurs de l'indice de compacité sont consignées dans le tableau (1-2).

Tableau 1-2 : Les valeurs de K_G calculer pour le bassin de Srou ainsi pour ses sous bassins

| Paramètres géométriques | Sous bassin versant de l'oued de Srou | | Bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah |
|-------------------------|---------------------------------------|------------|--|
| | Chbouka | Srou amont | |
| K_G | 1,46 | 1,70 | 1,44 |

Les valeurs de K_G montrent que le bassin versant de l'oued de Srou ainsi que ses sous bassins ont une forme allongée. A titre de comparaison, le sous bassin versant de l'oued de Srou en amont de la confluence avec l'oued de Chbouka a une forme très allongée par rapport au sous bassin de l'oued de Chbouka et de Srou à la station de Chacha N'mallah.

3. Indice du rectangle équivalent

Le périmètre (P) des bassins versants n'est généralement pas utilisé directement, mais le plus souvent à travers des valeurs qui en dérivent comme la « longueur L et la largeur l du rectangle équivalent » (LABORDE, 2000). Il s'agit d'une transformation géométrique qui permet d'assimiler le bassin à un rectangle de même périmètre et de même superficie.

| | |
|---|--|
| $L = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right]$ $l = \frac{K\sqrt{A}}{1.12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K}\right)^2} \right]$ | Avec : <ul style="list-style-type: none"> - L : longueur du rectangle équivalent en Km, - l : largeur du rectangle équivalent en Km, - K_G : l'indice de compacité de Gravélius, - S : Superficie du bassin versant (km²). |
|---|--|

L'indice du rectangle équivalent s'exprime comme suit :

$$Ir = \frac{L}{l}$$

Les valeurs de L et de l du rectangle équivalent présentés dans le tableau (1-3), confirment bien ce que nous avons déduit de la forme du bassin de Srou et de ses sous bassins à partir de l'indice de compacité de Gravelius.

Tableau 1-3 : Paramètres du rectangle équivalent pour le bassin du Srou ainsi ses sous bassins

| Paramètres géométriques | Sous bassin versant de l'oued de | | Bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah |
|-------------------------|----------------------------------|------------|--|
| | Chbouka | Srou amont | |
| L (km) | 39 | 78 | 78 |
| l(km) | 8,5 | 11 | 18 |
| Ir | 4,60 | 7,08 | 4,41 |

Le sous bassin versant de l'oued de Srou amont de la confluence est très allongé, il est 7 fois plus long, alors que le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et du bassin de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah sont 4 fois plus longs que larges.

Pour conclure, ces indices de forme montrent que le bassin versant de l'oued de Srou ainsi ses sous bassins sont très allongés. Ils soulignent l'homogénéité d'un bassin de forme allongé qui ressemble plutôt à une guitare.

Axe 2 : Hypsométrie et système de pente du bassin versant de l'oued de Srou

L'étude des caractéristiques hypsométriques du bassin versant concerne le relief et la pente. Ces facteurs topographiques sont le résultat d'une action mutuelle de la tectonique et du climat comme le mentionne BODIAN (2011) : « *créés par l'évolution géomorphologique et géologique et qui influencent l'écoulement* ».

L'analyse des caractéristiques hypsométriques nous a permis d'extraire l'organisation spatiale des reliefs, les altitudes et les pentes qui dominent conditionnement l'écoulement superficiel à l'échelle du bassin versant. L'étude hypsométriques du bassin versant de Srou a été réalisée à partir des MNT.

1. Hypsométrie du bassin versant de l'oued de Srou

L'étude de l'hypsométrie est nécessaire pour les analyses hydro-climatiques, car ce paramètre contrôle les gradients thermique et pluviométrique, les actions de l'air, le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. Ils sont donc un facteur majeur qui agit sur le comportement hydrologique des bassins versants.

1.1. Répartition spatiale des tranches d'altitudes

Le premier caractère hypsométrique à étudier est les tranches d'altitudes. Nous avons découpé le bassin versant en six classes d'altitudes, avec une équidistance de 300 m (Tableau 1-4). La figure (1-2) montre la répartition spatiale des tranches d'altitudes retenues. Cette représentation nous permet de faire sortir le pourcentage de chaque classe d'altitude et les reliefs qui les concernent.

Tableau 1-4: Tranches d'altitudes du bassin versant de l'oued de Srou

| Tranche d'altitude en (m) | Superficie en (Km ²) | Pourcentage |
|---------------------------|----------------------------------|-------------|
| < 900 | 106 | 8 |
| 900-1200 | 290 | 21 |
| 1200-1500 | 349 | 25 |
| 1500-1800 | 359 | 26 |
| 1800-2100 | 218 | 16 |
| >2100 | 52 | 4 |

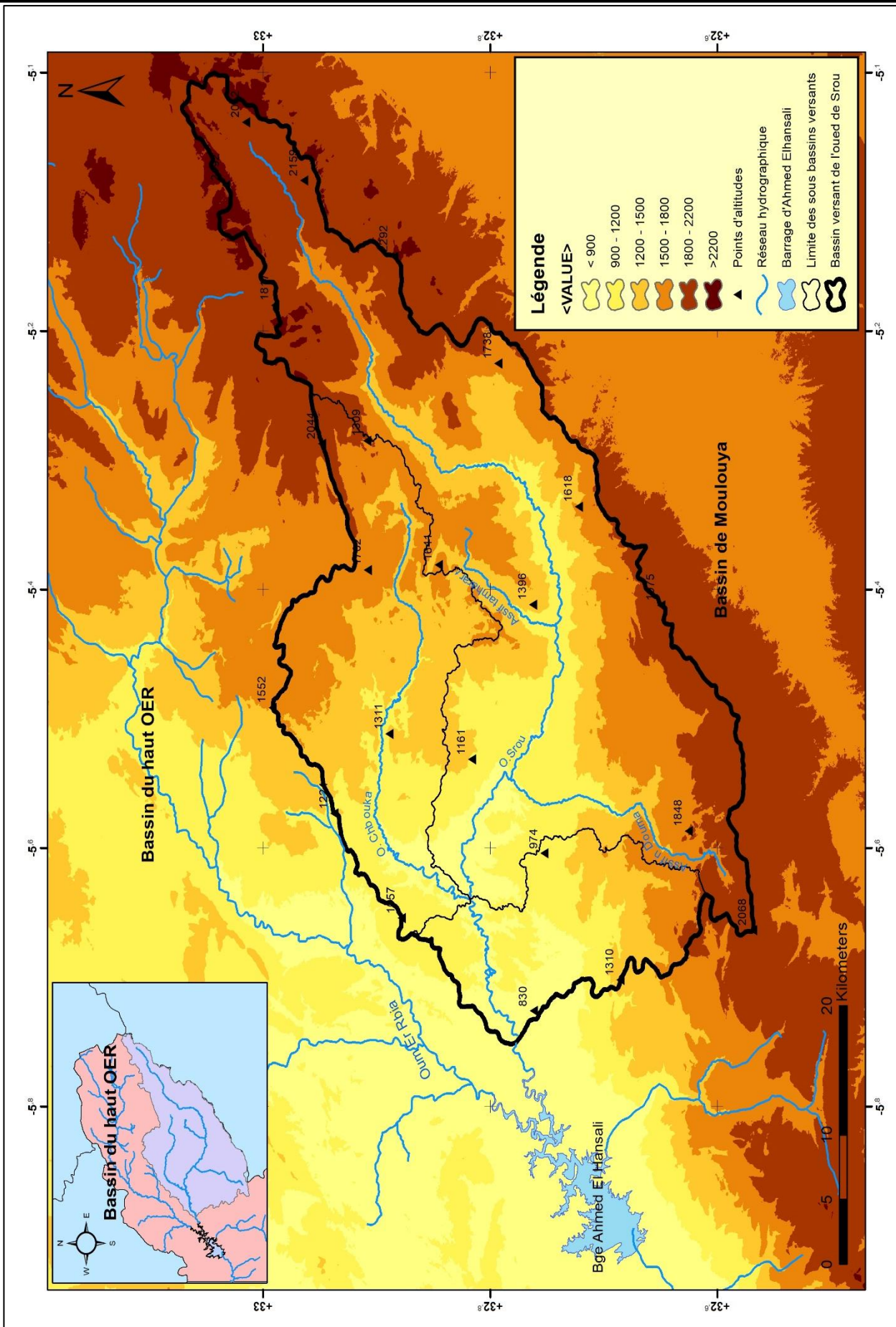


Figure 1-2: Carte des tranches d'altitudes à l'échelle du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)

Le bassin versant de l'oued de Srou est orienté selon un gradient nord-est sud-ouest. Les parties nord-est, sud-ouest et sud présentent des altitudes dépassant les 2000 m. C'est à ces altitudes que l'oued Srou et ses affluents oued Chbouka, Assif N'douma et Assif Tamharrart prennent leurs sources.

Plus de 71 % de la superficie du bassin versant de l'oued de Srou est dominé par des altitudes qui dépassent les 1200 m. Ceci signifie que le bassin versant est caractérisé par un relief très accentué et très varié, résultant de l'action combinée de la tectonique, de l'érosion régressive de l'oued Srou et de ses affluents, et de la succession des cycles d'érosion.

En effet, l'oued de Srou prend sa source dans une vallée étroite dans la région nord-est, perchée entre le dôme d'Aâri N'saâ à l'ouest et le col du Zad. La tranche d'altitude, comprise entre 1800 et 2400 m s'étale sur 46 % de la superficie du bassin. C'est dans cette région du nord-est que l'on trouve les rares sommets qui dépassent les 2000 m : Jbel Tgarda (2234 m), Jbel Boulhanny (2225 m), Jbel Taghamat (2044 m) ...

Les hauts reliefs du causses d'Ajdîr au nord-est et de celui de Srou au sud sont situés à des altitudes comprises entre 1200 et 1800. Soit 51 % de la superficie. Enfin, avec 29 % la tranche d'altitude comprise entre 691 et 1200 m est située au niveau du palier inférieur du bassin.

Dans le but de déterminer l'apport de chaque sous bassin versant, nous avons effectué une analyse hypsométrique pour le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et de Srou amont de la confluence. Le tableau (1-5) présent les superficies des tranches d'altitudes de chacun de ces sous bassins versants de l'oued de Srou. Sept classes ont été définies :

Tableau 1-5:Tranches d'altitudes des sous bassins de l'oued Srou

| Sous bassin versant de l'oued de | Tranches d'altitudes (m) | Superficie (Km ²) | Pourcentage | Cumul |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------|-------|
| Chbouka | <1049 | 53,6 | 16,4 | 100,0 |
| | 1049-1236 | 50 | 15,3 | 83,6 |
| | 1236-1385 | 57 | 17,4 | 68,4 |
| | 1385-1519 | 65 | 19,8 | 51,0 |
| | 1519-1635 | 54 | 16,5 | 31,1 |
| | 1635-1807 | 35 | 10,7 | 14,7 |
| | >1807 | 13 | 4,0 | 4,0 |
| Srou amont | <1039 | 121,6 | 14,2 | 100,0 |
| | 1039-1246 | 90,4 | 10,5 | 85,8 |
| | 1246-1436 | 112,9 | 13,1 | 75,3 |
| | 1436-1612 | 141,7 | 16,5 | 62,2 |
| | 1612-1795 | 137,4 | 16,0 | 45,7 |
| | 1795-2002 | 151,4 | 17,6 | 29,7 |
| | >2002 | 103,4 | 12,0 | 12,0 |

Au niveau du sous bassin versant de l'oued de Chbouka, la tranche d'altitude comprise entre 1800 et 2400 m occupe seulement 4 % de la surface. Elle représente les crêtes des hauts reliefs des plateaux d'Ajdir et de Srou. La tranche d'altitude comprise entre 1200 et 1600 m domine avec 53,7 %. Elle correspond aux reliefs des plateaux d'Ajdir au nord et de Srou au sud. Le reste de la superficie (31,7 %) est inférieur à 1200 m et représente le palier inférieur de la vallée de l'oued de Chbouka. Dans le sous bassin versant de l'oued de Srou amont, la tranche d'altitude comprise entre 1795 et 2002 m s'étale sur 17,6 % de la superficie. La tranche d'altitude inférieure à 1039 m représente seulement 14,2 % de la superficie du sous bassin.

1.2. Courbes hypsométriques et altitudes caractéristiques

L'analyse de la courbe hypsométrique nous permet d'avoir une idée sur la répartition des altitudes en fonction de leur surface. Le principe consiste à reporter les tranches d'altitudes (en m) sur l'axe des abscisses (X), et la superficie (en %) de chaque classe d'altitude sur l'axe des ordonnées (Y). La figure (1-3) présente les résultats pour le bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins.

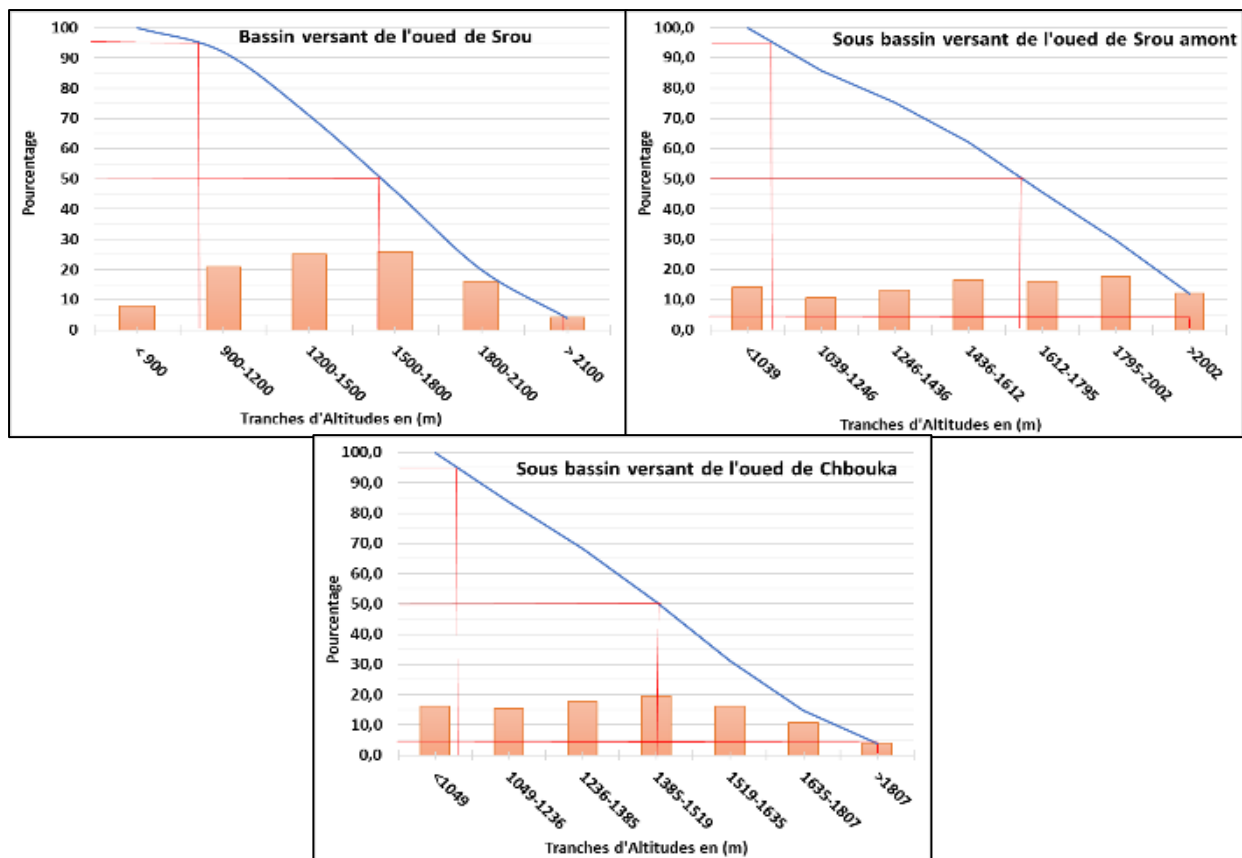


Figure 1-3 : Courbe hypsométrique et histogramme des fréquences des tranches d'altitudes du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins

L'observation de l'allure des courbes hypsométriques du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins élémentaires montrent qu'ils s'agissent des bassins jeunes, parce que l'altitude change sur une faible superficie. Ceci caractérise les bassins montagnards rudes.

Pour caractériser le relief dans un bassin versant on utilise des indices qui sont tirées à partir de la courbe hypsométrique ; l'altitude moyenne de la courbe hypsométrique H_{moy} en mètre, l'altitude médiane représentant l'altitude d'une fréquence de 50 % $H_{50\%}$ en mètre, l'altitude dépassée par 5 % de la superficie du bassin $H_{5\%}$ en mètre, l'altitude dépassée par 95 % de superficie du bassin versant $H_{95\%}$ en mètre et H_{max} et H_{min} . Les différentes altitudes caractéristiques que les courbes hypsométriques nous permettent de ressortir sont présentées dans le tableau (1-6) :

Tableau 1-6: Altitudes caractéristiques du bassin versant de l'oued Srou et ses sous bassins

| Bassin versant de | H_{max} | H_{min} | H_{moy} | $H_{5\%}$ | $H_{50\%}$ | $H_{95\%}$ |
|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|
| L'oued de Srou | 2332 | 691 | 1512 | 2330 | 1725 | 840 |
| L'oued de Chbouka | 2217 | 797 | 1507 | 2100 | 1685 | 1139 |
| Srou amont | 2332 | 787 | 1560 | 2002 | 1459 | 1109 |

Le bassin versant de l'oued de Srou et ses sous bassins présentent des altitudes caractéristiques importantes, ce qui montre la dominance des reliefs qui va modifier et favoriser l'écoulement des eaux de surface.

2. Système des pentes et leurs caractéristiques

C'est une caractéristique importante qui donne des renseignements sur la topographie du bassin. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct.

2.1. Pente moyenne du cours d'eau

La pente moyenne d'un cours d'eau détermine la vitesse avec laquelle l'eau se rend à l'exutoire du bassin, donc, le temps de concentration. Cette variable influence donc le débit maximal. Une pente abrupte favorise et accélère l'écoulement superficiel, tandis qu'une pente douce ou nulle donne à l'eau le temps de s'infiltrer, entièrement ou en partie, dans le sol, si le substratum le permet. Le calcul des pentes moyennes et partielles du cours d'eau s'effectue à partir du profil longitudinal du cours d'eau principal et de ses affluents. La méthode la plus fréquemment utilisée pour calculer la pente longitudinale du cours d'eau consiste à diviser la

différence d'altitude entre les points extrêmes du profil par la longueur totale du cours d'eau (ROCHE, 1963). La pente moyenne est donnée par la relation suivante :

| | |
|--------------------------------|--|
| $P_{moy} = \frac{\Delta H}{L}$ | <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - P : est la pente moyenne du bassin versant. - ΔH : est la différence d'altitudes maximal et minimal du bassin versant (m) - L : est la longueur du rectangle équivalent (km). |
|--------------------------------|--|

Le sous bassin versant de l'oued de Chbouka présent l'indice de pente moyenne le plus forts, il est de l'ordre de 36,41 m/km, ceci favorise l'écoulement superficiel rapide et l'apparition des crues inondables. La pente moyenne dans le bassin de Srou est de l'ordre de 21,04 m/km.

Tableau 1-7 : La pente moyenne du bassin versant de l'oued de Srou et ses sous bassins élémentaires

| Bassin versant de | ΔH (m) | L(km) | Pmoy (m/km) |
|----------------------|----------------|-------|-------------|
| L'oued de Srou | 1641 | 78 | 21,04 |
| L'oued de Chbouka | 1420 | 39 | 36,41 |
| L'oued de Srou amont | 1545 | 78 | 19,81 |

2.2. Indice de pente global

Sur la courbe hypsométrique, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5 % de A. On déduit les altitudes $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ entre lesquelles s'inscrit 90 % de l'aire du bassin et la dénivelée $D = H_{5\%} - H_{95\%}$. L'indice global est égal à :

| | |
|---------------------|--|
| $I_g = \frac{D}{L}$ | <p>Avec</p> <ul style="list-style-type: none"> - I_g : Indice de pente global - $D = H_{5\%}$ et $H_{95\%}$: représentent respectivement les hauteurs qui correspondent à 5% et 95% de la superficie du bassin. - L : est la longueur du rectangle équivalent en km |
|---------------------|--|

Tableau 1-8: Indice de pente globale pour le bassin versant de l'oued de Srou et ses sous bassins

| Bassin versant de | L (km) | D (m) | Ig (m/km) |
|-------------------|--------|-------|-----------|
| L'oued de Srou | 78 | 1490 | 19,10 |
| L'oued de Chbouka | 39 | 961 | 24,64 |
| Srou amont | 78 | 893 | 11,45 |

L'indice de pente globale calculé pour le bassin versant de l'oued de Srou et ses sous bassin versant (Tableau 1-8), montre des valeurs moyennes Selon la classification de l'ORSTOM. Ces valeurs sont de l'ordre de 24,64 m/km dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka, de 19,10 m/km dans le bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah est de 11,45 m/km dans le sous bassin versant de Srou amont. Ceci signifie que le relief dans le bassin versant de l'oued de Srou est assez modéré, et l'importance des pentes traduit une variété considérable de l'écoulement superficiel des eaux.

Le calcul de l'indice de pente global sert évidemment à classer le relief d'un bassin. Mais pour permettre une comparaison plus efficace et plus poussée du dit bassin, de point de vue relief, il convient de calculer la dénivelée spécifique Ds.

2.3. Dénivelée spécifique Ds

Elle permet une comparaison entre les bassins versants, indépendamment de la surface et permet de déterminer une classe de relief qui situe le bassin versant dans un plan orographique. Ds a été définie par l'ORSTOM (DUBREUIL & CUISCAFRE, 1971).

| | |
|----------------------|---|
| $D_s = I_g \sqrt{A}$ | Avec - I _g est l'indice de pente global - A : la superficie du bassin versant (km ²) |
|----------------------|---|

Tableau 1-9: Classification de l'O.R.S.T.O.M du relief

| | | |
|----|---------------------|---------------------|
| R1 | Relief très faible | $D_s < 10m$ |
| R2 | Relief faible | $10m < D_s < 25m$ |
| R3 | Relief assez faible | $25m < D_s < 50m$ |
| R4 | Relief modéré | $50m < D_s < 100m$ |
| R5 | Relief assez fort | $100m < D_s < 250m$ |
| R6 | Relief fort | $250m < D_s < 500m$ |
| R7 | Relief très fort | $D_s > 500m$ |

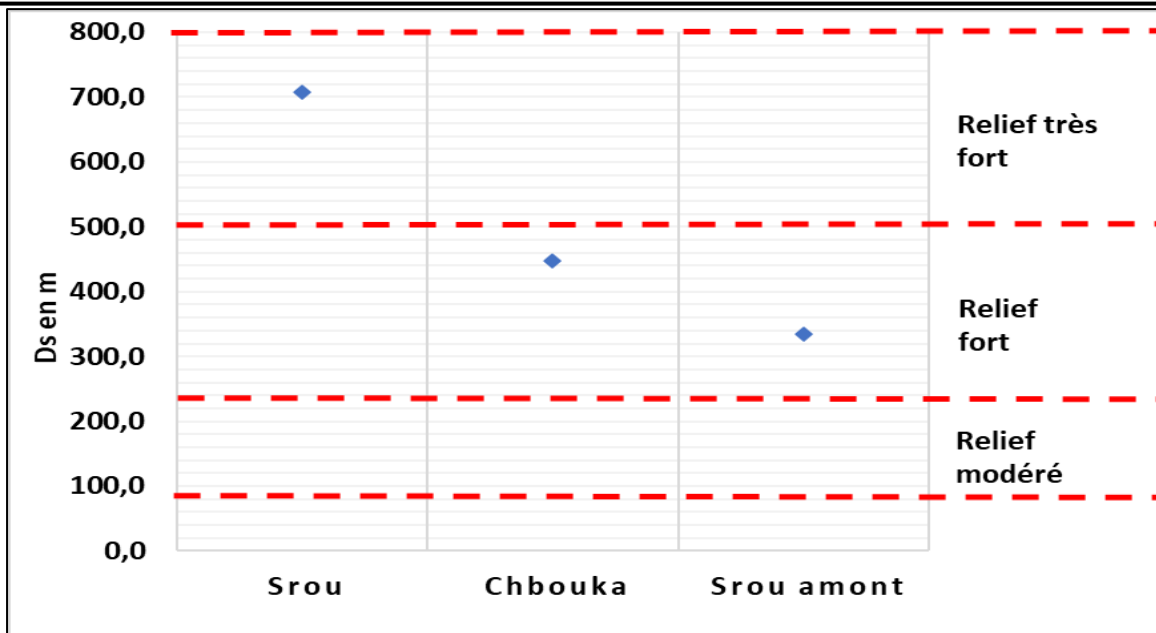


Figure 1-4 : La dénivelée spécifique au niveau du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous-bassin versant

Le graphe de la figure (1-4) montre que toutes les valeurs de la dénivelée spécifique (Ds) du bassin de Srou et ses sous-bassin versant sont supérieures à 300 m, signe d'un relief fort à très fort. Ceci confirme les résultats déjà obtenus pour les différents indices, et ce qui témoigne de l'importance des blocs de calcaire et calcaro-dolomitiques situés au nord-est du bassin avec une dénivelée spécifique qui dépasse les 450 m.

2.4. Répartition spatiale des pentes

La carte de la répartition des pentes est réalisée sur la base de la MNT du Maroc central à une résolution de 30 m (Figure 1-5). Nous avons classé les pentes du bassin versant de l'oued de Srou en quatre groupes : Pentes faibles (inférieure à 10 %), pentes moyennes (entre 11 et 30%), pentes fortes (entre 31 et 50 %) et pentes très fortes dont l'inclinaison est supérieure à 51%.

On peut constater que le bassin versant de l'oued de Srou présente des versants ayant des pentes très différenciées et très hétérogènes. On remarque une prédominance des pentes moyennes et fortes, ces deux classes sont plus ou moins présentées dans tout le bassin versant. Ces classes de pentes représentent plus de 50,8 % de la superficie totale du bassin versant, concordent bien avec les hauts plateaux situés dans le bassin versant, aux terrasses et fonds de vallées.

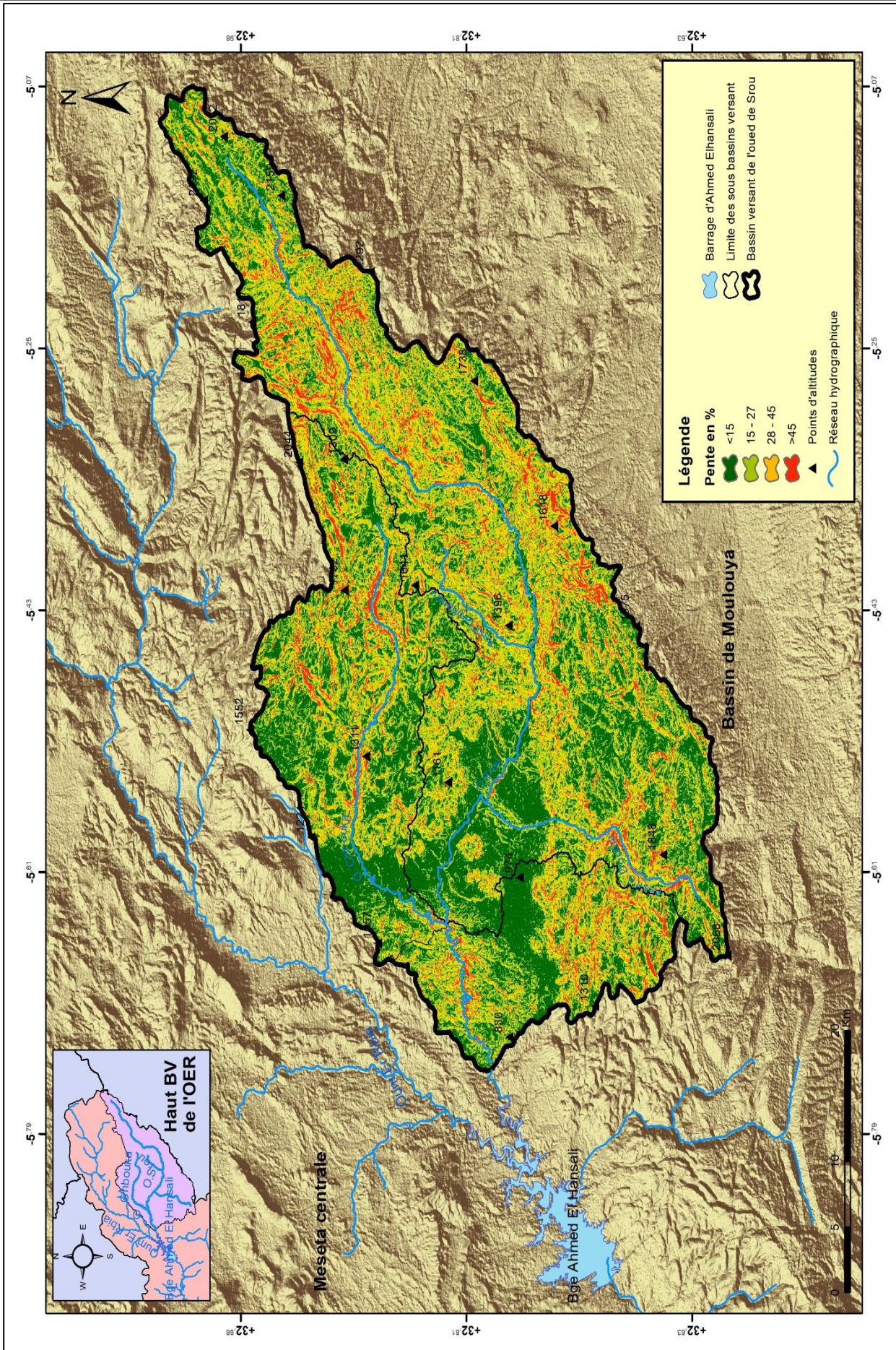


Figure 1-5 : Cartes des classes des pentes du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins (MNT 2016)

Quant aux pentes fortes et très fortes, elles sont bien développées dans les parties nord-est et sud-ouest du bassin versant. Vers l'aval du bassin, la pente devient de plus en plus faible.

Enfin, ces indices ont permis de définir une certaine homogénéité du relief entre le bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins versants. Cette homogénéité se traduit, comme on peut constater sur les graphes hypsométriques, par une domination des tranches d'altitude fortes situées entre 1400 et 1800 m.

A priori, et vue des résultats de ces indices, le relief n'apparaît pas comme un paramètre suffisant de différenciation entre les régimes d'écoulement entre les sous bassins versants. Nous allons, essayer de comprendre l'impact du substratum géologique sur l'écoulement.

3. Organisation du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement (MUSY ET AL, 2004). Des eaux provenant du ruissellement ou restituées par les nappes souterraines, soit sous forme de sources, soit par restitution continue le long du lit du cours d'eau (ROCHE, 1963). L'organisation spatiale des réseaux hydrographiques et leurs densités est conditionnée par plusieurs facteurs naturels. Il s'agit de la géologie, les reliefs et leurs pentes, la lithologie, la tectonique, le climat et la présence humaine...etc. En conséquence, l'état actuel du réseau hydrographique est le résultat de la longue évolution géomorphologique que la région a subie. Les structures de drainage changent au cours du temps et modifient plus ou moins profondément le paysage (LOSSON, 2003).

3.1. Cartographie du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou

La digitalisation du réseau hydrographique nécessite de travailler sur une carte à une échelle adéquate (BENTEKHICI, 2006). La reproduction cartographique du réseau hydrographique est d'autant plus fidèle que l'échelle de la carte est grande et que la région représentée est peu peuplée ou économiquement peu développée (DUBREUIL, 1974). Dans le bassin versant de l'oued de Srou, l'échelle 1/50000 reste la plus adaptée.

La cartographie du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou a été réalisée à partir des six cartes topographiques 1/50000 qui couvrent le bassin et le MNT du Maroc central avec une résolution de 30 m.

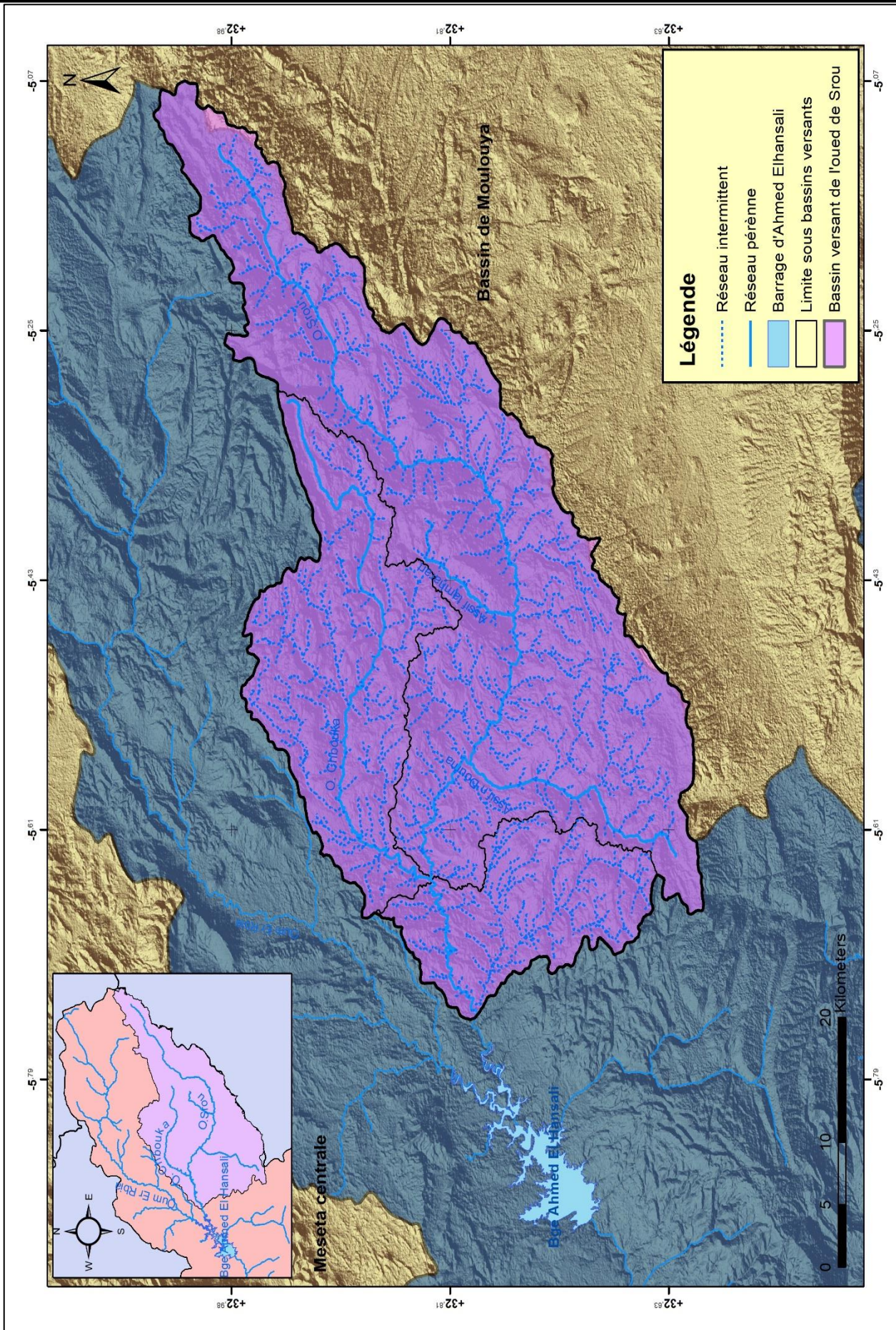


Figure 1-6 : Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)

Les paramètres les plus utilisés pour la caractérisation du réseau hydrographique sont : la hiérarchisation du réseau, le développement (nombres et longueurs des cours d'eau) densité de drainage, les rapports de longueur et de confluence. Leur détermination exige que soit définie une classification des thalwegs par ordres et que soient mesurés pour chaque ordre les nombres de thalwegs et les longueurs totales de ceux-ci (DUBREUIL, 1974).

3.2. Longueur caractéristique du cours d'eau principale

Un bassin versant se caractérise principalement par la longueur suivante : La longueur du cours d'eau principal (L) ; c'est la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'à la ligne de partage des eaux, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement et par extension du dernier jusqu'à la limite topographique du bassin versant. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. On note l'existence de plusieurs affluents alimentant l'oued Srou, le long de ses deux rives. De l'est vers l'ouest, les principaux affluents avec écoulement pérenne de l'oued Srou sont (Figure1-6) :

- Affluents de la rive droite : Tamharart et Chbouka,
- Affluents de la rive gauche : Assif N'douma.

Les longueurs totales de ces cours d'eaux sont présentées dans le tableau (1-10).

Tableau 1-10: Les longueurs totales des cours d'eau du bassin versant de l'oued de Srou ainsi de ces principaux affluents

| | Oued Chbouka | Assif N'douma | Assif Tamharrart | Oued Srou |
|---------------|--------------|---------------|------------------|-----------|
| Longueur (km) | 45,5 | 24,8 | 14 | 99,4 |

3.3. Profile en long

Le profil en long est un graphique dont on porte en abscisse la distance à l'exutoire et en ordonnée l'altitude du point correspondant. Les chutes brutales apparaissent sous forme d'un trait vertical, les chutes échelonnées et les rapides importants se traduisent par une courbe à très forte pente (ROCHE, 1963). L'intérêt du profil en long d'un cours d'eau réside dans la caractérisation de la pente que suit le fond d'un cours d'eau de l'amont à l'aval.

Le profil en long peut être produit à partir de la carte topographique. Les techniques des Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent également d'établir facilement les différents profils en longs des cours d'eau à partir des MNT. Néanmoins, le profil ainsi créé

peut présenter des anomalies et des défauts qui nécessitent un traitement et des corrections. Nous avons réalisé le profil en long de l'oued de Srou ainsi de ces principaux affluents sur la base de l'MNT qui couvre le Maroc central et en partie le bassin versant de l'oued de Srou. Le figure (1-7) montre les profils de ces cours d'eau.

En regardant le profil en long de l'oued de Srou, le tracé du cours d'eau apparaît, d'amont en aval, comme un entonnoir largement ouvert. Il traverse tout d'abord les séries de dolomies et calcaires jurassiques des Causses du Srou, l'écoulement s'effectue de manière plus ou moins rectiligne avec une pente très forte dans cette partie. En progressant vers l'aval, la vallée est comblée d'alluvions en partie perméables. Elle est entaillée dans les argiles triasiques imperméables. Les argiles du Trias sont très abondantes ce qui peut exercer une influence sur l'étanchéité des alluvions. Cette partie du secteur d'étude se caractérise par un relief faible à modéré. Dans le bas Srou, l'oued s'enfonce dans les terrains paléozoïques où il collecte les eaux de l'oued Chbouka.

L'affluent principal de l'oued de Srou est celui l'oued de Chbouka. Celui-ci prend sa source dans les hauts reliefs du causses d'Ajdir. Il se caractérise par une pente moyenne très forte. Il a creusé sa vallée dans des formations Permo-Triasiques. Dans sa partie aval, et avant de rejoindre l'oued de Srou dans la région d'Elhri, il s'enfonce cette fois dans les formations schisteuses du Viséen.

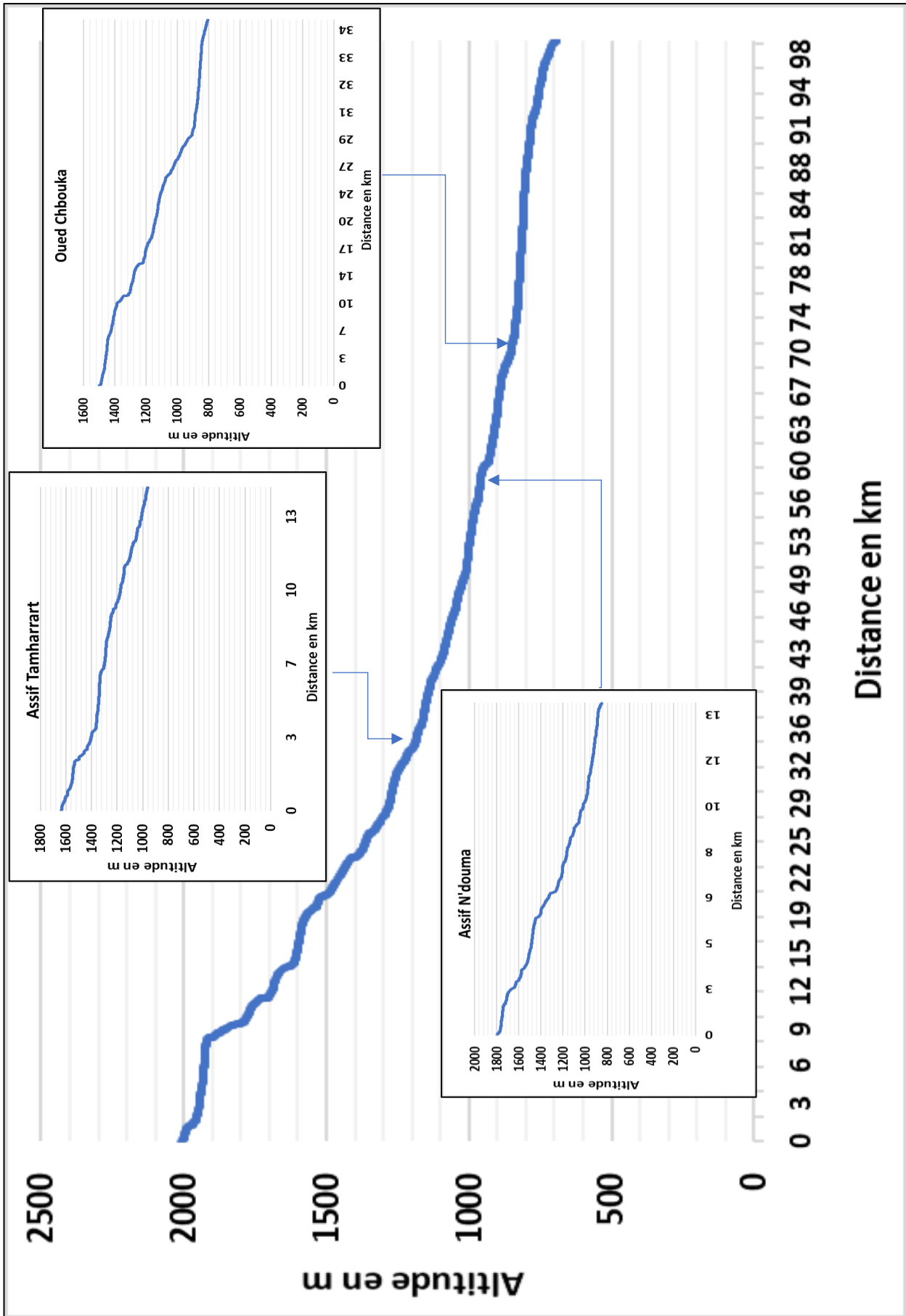


Figure 1-7: Profil en long de l'oued de Srou et de ses principaux affluents

3.4. Densité de drainage

La densité de drainage d'un bassin est un paramètre reflétant son écoulement, la stabilité du réseau hydrographique et le type de ruissellement de surface (LLAMAS, 1993). Elle dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant, et dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques (MUSY & HIGY, 2004). La densité de drainage (Dd) est le rapport entre la longueur totale des drains et la surface du bassin versant :

| | |
|--------------------------|---|
| $Dd = \frac{\sum Li}{A}$ | Avec : <ul style="list-style-type: none"> - Dd : densité de drainage (km/km²) - Li : longueur des cours d'eau (km) - A : surface du bassin versant (km²) |
|--------------------------|---|

Sur les cartes topographiques qui couvrent le bassin versant de l'oued de Srou, on peut voir deux types de drains : pérenne et intermittent. La densité de drain maximale correspond à l'ensemble des oued pérennes. Ces drains sont secs sur une grande partie de l'année. La densité est plus importante dans le bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah (Tableau 1-11). La présence d'un réseau hydrographique dense, dans le sous bassin versant de l'oued de Srou amont, joue un rôle principal dans les processus d'érosion. Il est à l'origine de l'érosion régressive à la base des versants sous forme de ravinements et bad-lands essentiellement sur la rive gauche.

Tableau 1-11 : Densité de drainage du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins

| | Sous bassin versant de l'oued de Chbouka | Sous bassin versant de l'oued de Srou amont | Bassin versant de l'oued de Srou |
|-------------------------------|--|---|----------------------------------|
| $\sum Li$ (km) | 843 | 2633,8 | 4382 |
| Superficie (km ²) | 319 | 858 | 1374 |
| Dd (km/km ²) | 2,64 | 3,07 | 3,19 |

Le sous bassin versant de l'oued de Chbouka possède une densité de drainage plus faible par rapport aux autres bassins, ceci est lié à la lithologie du sous bassin dominée par le calcaire et la dolomie de perméabilité importante. Ceci favorise l'écoulement souterrain ainsi que le ruissellement.

Axe 3 : Présentation et analyse du milieu naturel du bassin versant de l'oued de Srou

Dans cet axe nous allons faire une étude concernant les ensembles lithologiques, tectoniques et structurales à l'échelle du bassin versant de l'oued de Srou.

La connaissance de la structure géologique du bassin versant est fondamentale pour comprendre le rôle du substratum et son impact sur les écoulements superficiels et souterrains. La chaîne du Moyen-Atlas central et la meseta ont été l'objet des recherches géologiques depuis le début du 20ème siècle. Ces études ont concerné la géomorphologie, la stratigraphie, la lithologie, la paléogéographie et la tectonique. Parmi les géologues dont cette partie de la chaîne atlasique a attiré curiosité, on trouve : TERMIER (1936) ; TERMIER ET DUBAR (1940) ; BEAUDY (1969) ; DU DRESNAY (1988) ; MARTIN (1981) ; BENCHEKROUN (1987) ; BENKADDOUR (1993) ; FETHALLAH (2001) ; OUARHACHE (2002) ; ARBOLEYA ET AL (2004) ... etc.). Sur la base de ces travaux on a essayé de tirer l'essentiel des caractéristiques géologiques du bassin versant de l'oued de Srou. Nous allons, en outre, donner de l'intérêt à leur extension spatiale et à leur processus de formation.

Les résultats de la présente étude seront utilisés pour identifier et classer le substratum du bassin en terrains perméables, semi-perméables et imperméables. La dominance de l'une des trois classes de perméabilité doit nous renseigner sur le comportement du bassin versant vis-à-vis de l'écoulement.

1. Géologie du bassin versant de l'oued de Srou

Le bassin versant de l'oued de Srou est situé à cheval sur deux domaines structuraux du Maroc : à l'est le domaine mesetéen et à l'ouest le domaine atlasique. Il est caractérisé par l'affleurement à l'ouest des terrains paléozoïques qui font partie de la chaîne hercynienne. Ces terrains sont représentés essentiellement par des séries détritiques grésoschisteuses d'âge ordovicien. Par-dessus ces terrains reposent les terrains mésozoïques qui affleurent dans la moyenne partie du secteur, représentés par les séries argileuses évaporitiques à intercalation de coulées basaltiques du Trias, les calcaires et dolomies de la plateforme carbonatée du Jurassique qui constitue le Causse Moyen-Atlasique, les marno-calcaires du Crétacé sont limités au sud-ouest du secteur. Les terrains quaternaires affleurent sporadiquement dans les parties basses du relief montagneux et sont représentés par des dépôts à croutes calcaires et des limons (Quaternaire ancien) ou des alluvions et limons (Quaternaire récent) (Figure 1-8).

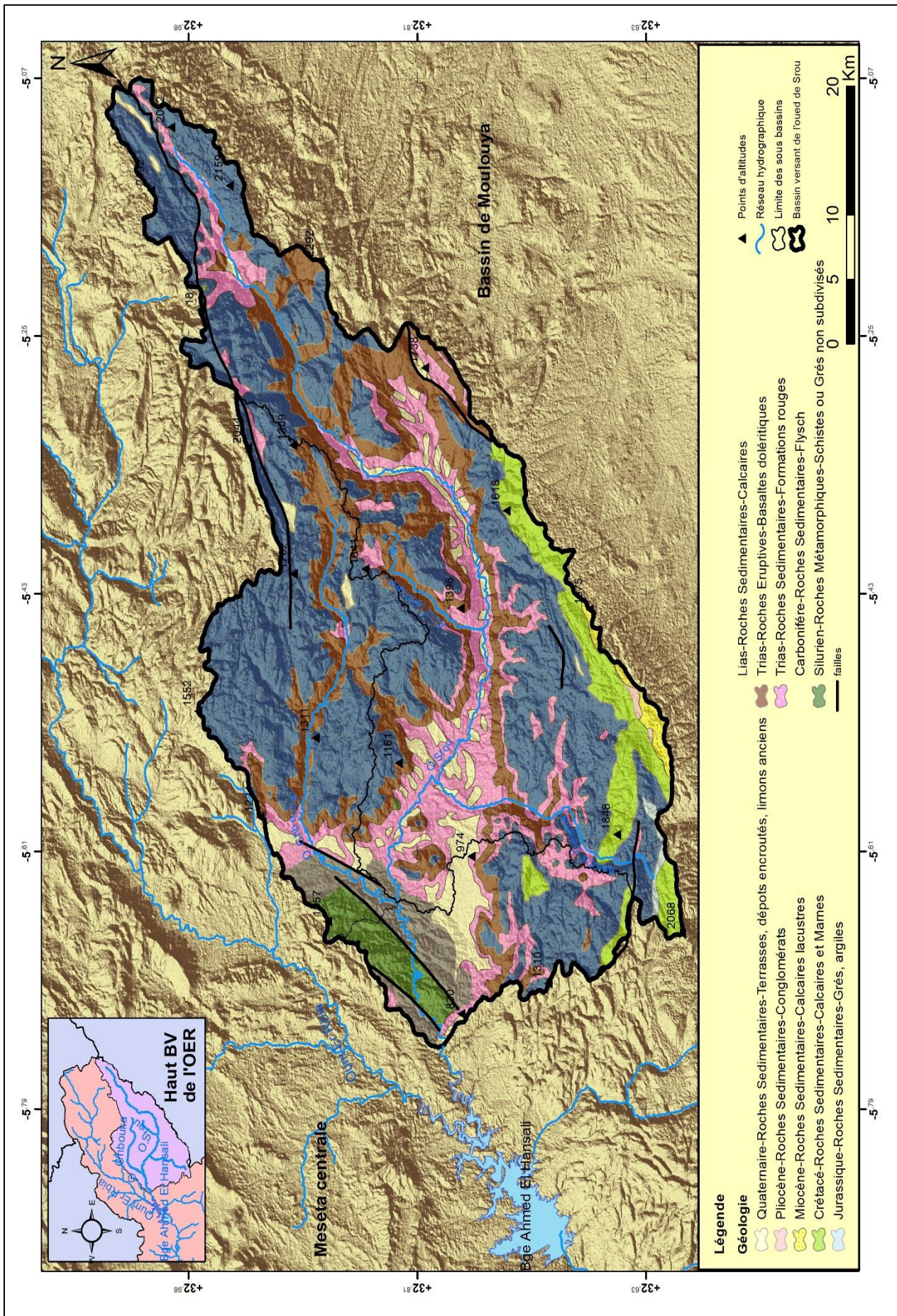


Figure 1-8 : Carte géologique du bassin versant de l'oued de Srou (feuille de Rabat 1/500000)

Le bassin versant de l'oued de Srou constitue l'une des principales zones du Maroc où les séries rouges triasiques affleurent largement, à côté du bassin versant de l'Ourika situé dans le Haut Atlas (ELBOUQDAOUI, 2005). Le Moyen-Atlas est caractérisé par des sédiments mésozoïques, délimités de part et d'autre par des plateaux paléozoïques plus ou moins rigides : la Meseta occidentale à l'ouest et la Meseta orientale à l'est.

1.1. Histoire géologique de la formation des chaînes Moyens Atlasiques

Au cours du paléozoïque, la terre a été formée d'un seul continent (la Pangée) avec un seul océan (le Téthys). Au Trias, ce gigantesque continent commence à se démanteler en plaques qui s'éloignent les unes des autres. Ce mouvement a engendré l'ouverture des océans et la mise en place des fossés continentaux (Rift de graben), à la place du Moyen et du Haut Atlas actuelles. Cette fosse continue de s'enfoncer lors du Trias et du Jurassique inférieur et leur centre a subi une sédimentation continentale rouge avec des montées des roches volcaniques. Un abaissement successif de ces fossés a lieu et une transgression marine a été déclenchée. L'eau de la mer a envahi cet espace pour une longue période (Aire secondaire).

Au Mésozoïque, la sédimentation marine est très puissante dans les fossés Moyens Atlasiques avec une différenciation très prononcée.

Les tendances compressives mondiales du Tertiaire et qui sont dues à la collision entre la plaque africaine et celle de l'Europe, ont donné naissance à une pression septentrionale et la formation de la chaîne Atlasique.

L'évolution géologique longue avec des phases tectoniques nombreuses, la régression de la mer et l'action des processus érosifs due aux conditions bioclimatiques du Tertiaire et Quaternaire, ont engendré des affleurements géologiques constitués des roches secondaires (ARBOLEYA ET AL., 2004). Ces affleurements reposent sur un substratum paléozoïque (DRESNAY, 1988 IN BENKADDOUR, 1993).

1.2. Formations lithologiques du bassin versant de l'oued de Srou

Le bassin versant de l'oued Srou présente une complexité lithologique. Dans le plateau central, on trouve des formations imperméables (schistes et du quartzite primaire). Au niveau du Moyen-Atlas, les hauts plateaux sont formés essentiellement des structures fissurées perméables (calcaire et dolomie). Les anticlinaux du Moyen-Atlas Plissé, sont constitués de basalte doléritique et d'argile rouge imperméable.

- **Terrains paléozoïques**

Les formations paléozoïques affleurent dans le Sud-Ouest du bassin versant de l'oued Srou. Elles font partie de l'anticlinorium de Kasba Tadla-Azrou, constituées de terrain cambro-ordovicien autochtones sous forme d'anticlinaux et de formation allochtones viséenne.

- Ordovicien : Ce sont des alternances de schistes et des bancs quartzitiques silicifiées, sous forme des boutonnières, en discordance angulaire avec les formations schisto-calcaires de viséen moyen. Ces terrains apparaissent sous forme de boutonnières anticlinales dans la ceinture entre Zaouit Ait Ishak et l'ouest d'Elhri, et sont regroupés dans des formations exclusivement détritiques. Ils sont caractérisés par la présence des schistes noirs, micacés, riches en matières organiques et des bancs de quartzites.

- Carbonifère : Il est constitué par une série schisto-calcaire, orienté suivant une direction NNE-SSW et déversé à l'Est, elle est en contact anormal avec les formations dévoniennes, les barres calcaires sont moins développées. Trois séries se distingues (BOUABDELLI 1989) ;

- Une série inférieure au calcaire renfermant des schistes gréseux, et des conglomérats

- Une série schisto-calcaire formée de schistes à plusieurs barres calcaires scarifiées.

- Une série supérieure au calcaire composée de schistes verts en dalles, de schistes gris et de petits bancs de grès

- Permien : Il est représenté par des couches continentales surtout de couleur rouge, le plus souvent détritiques, limitées par des failles, dont certaines sont conservées dans le Massif central (EL WARTITI, 1990).

- **Permo-Trias**

Cette couverture est présente sur la vallée de l'oued Srou, la vallée de l'oued Chbouka, le synclinale de Zad en amont du bassin. Elle présente une association entre trois termes ;

- A la base une formation déritique et argilo-salifère

- Dans la partie moyen une formation basaltique

- Au sommet une formation argilo-salifère.

Le Permo-Trias présent une nette discordance avec les formations paléozoïques de base. L'épaisseur moyenne de cette formation varie de quelques centimètres à des dizaines de mètres. Il peut s'absenter dans plusieurs régions (ROBILLARD, 1978).

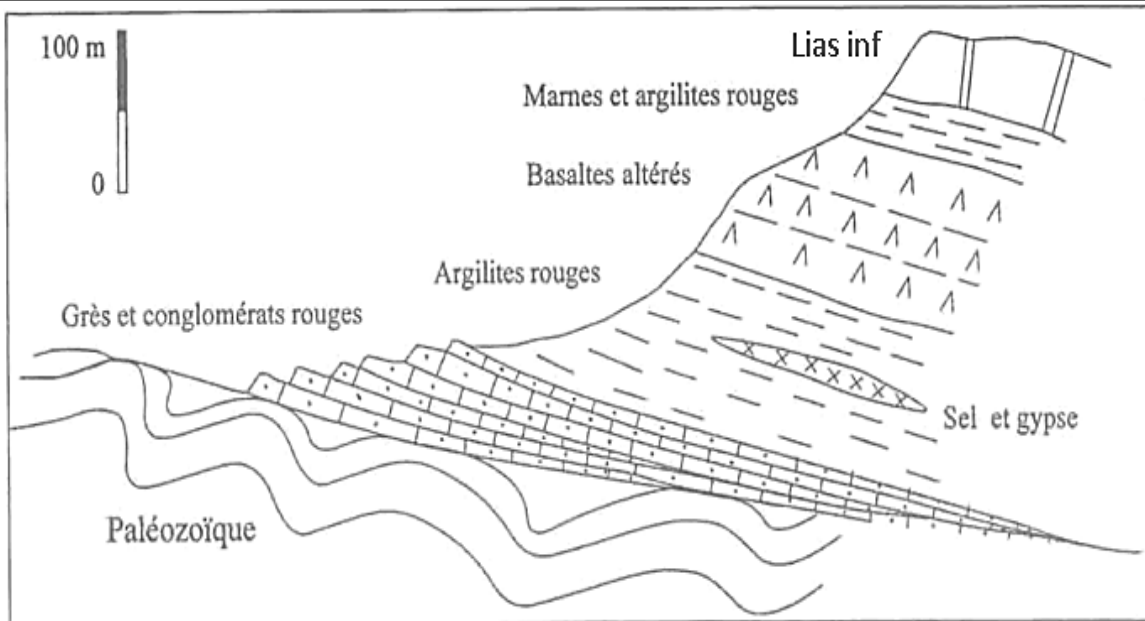


Figure 1-9: Facies couplet du Trias (secteur de l'oued Srou, d'après Martin, 1980).

- **Lias**

Deux formations qui se distinguent ; les formations du lias inférieur et celles du Lias Moyen. Ils se localisent au nord et au sud de la vallée du Srou. Le Lias, occupe la majorité du secteur d'étude

- Lias inférieur : Le Lias inférieur est représenté par des formations à faciès dolomitiques et calcaire-dolomitiques, massives. Il caractérise un régime généralement stable du point de vue tectonique et sédimentologique. Ce type de formations affleure très largement tant dans le domaine du causse Moyen-Atlasique (hauts plateaux de l'oued Srou), que dans le domaine du Moyen-Atlas plissé (COLO, 1961).

- Lias moyen : Ces formations affleurent généralement dans le sud-ouest du bassin. Durant cette phase s'instaure une sédimentation franchement calcaire où les variations de faciès sont importantes. L'abondance des Ammonites et la variété des faciès pétrographiques au sein de ces calcaires autorisent la subdivision en deux sous-étages : le Carixien et le Domérien. La limite Carixien-Domérien se place au-dessus des premiers Protogrammoceras à côtes fines et serrées. Cette coupure paléontologique est accompagnée d'une variation de faciès : les calcaires noirs du Carixien passant aux calcaires gris à intercalation marneuse du Domérien (Colo. 1961).

- **Crétacé (Turonien)**

Se rencontrent sur la crête sud-est du bassin Formés de calcaire dolomitique et de marno-calcaires, de couleur blanchâtre ou jaunâtre, les terrains crétacés surmontent les dolomies liasiques au niveau des crêtes sud qui dominent le bassin (El bouqdioui, 2007).

- **Mio-pliocène**

Le Mio-pliocène qualifie deux périodes ; le Miocène et le Pliocène. Le Miocène valide sa présence par des dépôts marins miocènes, discordants sur l'ensemble méso-cénozoïque atlasique. Il est caractérisé lithologiquement par : des grès calcarifères, des galets bien roulés de roches jurassiques et paléozoïques, des grès calcaires jaunes, des grès sableux et argileux, des argiles un peu marneuses et des poudingues à galets de roches jurassiques et paléozoïque. Alors que le Pliocène est représenté par des conglomérats. Ces faciès sont en affleurement en fonction des accidents et dans la vallée de l'oued Srou et ses affluents, où la série triasique atteint son maximum (El bouqdioui, 2007).

- **Quaternaire**

Le quaternaire Ancien et Moyen correspond à des alluvions, et à un fragment de coulée résiduelle de basalte "vacuolaire" qui emballe des éléments de dolomie et de calcaire à silex liasiques, de calcaire éocène et de conglomérat oligocène. Il correspond aussi aux masses d'éboulis parfois très importantes, les dépôts fluviaux dus aux oueds (Termier, 1936). Il affleure sous forme des îlots dans le lit de l'oued Srou et oued Chbouka. Le quaternaire récents correspond aux dépôts lacustres (calcaires lacustres et alluvions). Le Quaternaire récent et l'actuel longent les talwegs des cours d'eau et les terrasses comprenant les formations modernes (alluvions, éboulis, dayas), les terrasses limoneuses et limons rouges avec présence locale de galets de nature lithologique variable.

1.3. La tectonique

La chaîne du Moyen-Atlas a subi des mouvements tectoniques différentes. Chaque unité atlasique a son propre mouvement, plus ou moins différent que l'autre, et ces deux structures sont séparées par l'Accident nord Moyen-Atlasique.

La couverture Liasique du Moyen-Atlas tabulaire est fréquemment ondulé : ce sont des bombements, des cuvettes évasées, des chaînes qui accidentent les plateaux s'étageant en paliers successifs reliés par des flexures peu marquées. Plus encore que ces mouvements souples, la tectonique cassante joue un rôle morphologique fondamental. Les moindres fractures ont guidé le réseau hydrographique. Des failles de plus ou moins à grande ampleur délimitent les escarpements des bordures. Toute la région est hachée de failles qui exagèrent les synclinaux qui deviennent des fossés tectoniques, dénivellent des blocs monoclinaux. Les

directions les plus fréquentes sont SW-NE et NS ainsi qu'EW entre Oum-Er-Rbia et Srou (LEPOUTRE ET MARTIN, 1967).

L'analyse de la déformation tectonique dans les terrains Méso-Cénozoïques du Moyen-Atlas plissé a permis de mettre en évidence plusieurs phases tectoniques, parmi lesquelles la phase tectonique d'âge miocène inférieur. Il s'agit des failles normales, des fentes de tension, des décrochements dextres subméridiens, des décrochements sénestres, des plis, des failles inverses et une schistosité de fracture. (HINAJE, 2004).

Les mouvements tectoniques qui règnent dans la région engendrent plusieurs accidents ; Le célèbre est celui du nord Moyen-Atlasique, situé à la limite entre la chaîne plissée et le causse sub-tabulaire, se décompose en deux branches longitudinales de direction NE-SW. Ces deux dernières sont recoupées par des failles transversales orientées NW-SE, à jeu senestre (FEDAN, 1989). L'accident sud Moyen-Atlasique ou accident d'Aït Oufella sépare le Moyen-Atlas plissé de la meseta orientale et la plaine de la Moulouya.

1.4. Entités structurales du bassin versant de l'oued de Srou

La zone est formée de trois unités structurales, deux appartiennent au Moyen-Atlas ; le Moyen-Atlas tabulaire ou causses Moyen-Atlasique au NW qui sont séparées du Moyen-Atlas plissé au SE par l'accident Nord Moyen-Atlasique et la Meseta centrale (ARBOLEYA ET AL., 2004)

- ***Le causse Moyen-Atlasique***

Les causses Moyenne-Atlasiques offrent des paysages classiques de hauts plateaux calcaires. C'est le domaine de roches carbonatées : calcaires et dolomies. Ces plateaux sont composés essentiellement de carbonates du Lias inférieur et moyen reposant sur des argilites Triasiques (RHOUJJATI 2007). Cet ensemble sédimentaire est structuré en plateaux étagés reflétant une organisation en blocs basculés par des failles normales mineures (MARTIN, 1981). Ces formations sont parsemées des épanchements volcaniques épars d'âge quaternaire (HERBIG, 1988).

- ***Le Moyen-Atlas plissé***

Cette partie du Moyen-Atlas se distingue des causses sub-tabulaires par la présence des successions des rides orientés dans la direction générale de la chaîne Sud-Ouest Nord-Est. Ces formations anticlinales englobent des dépressions synclinales, qui jouent un rôle de dépo-centres marneux et marno-calcaires depuis le Jurassique. Les rides sont formées de

calcaires liasiques et en position axiale d'argiles triasiques et des formations magmatiques (FEDAN, 1988).

- ***La meseta centrale***

Elle est formée de terrains paléozoïques plissés métamorphisés au cours de l'orogénèse hercynienne et peu déformés par des mouvements alpins (HOEPFFNER ET AL., 2005).

2. Perméabilité dans le bassin versant de l'oued de Srou

La perméabilité d'un substratum ou d'une roche donnée, peut être définie comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (FOUCAULT ET AL, 2010). Trois catégories de perméabilité ont été définies ;

- Roches perméables
- Roches semi-perméables
- Roches imperméables

Les formations du bassin versant de l'oued Srou ont été réparties en trois ensembles en fonction de leur perméabilité (Figure 1-10) :

2.1. Ensembles lithologiques perméables

Les formations hydrogéologiques perméables, constituent les gisements d'eau souterraine ou aquifères, dont elles identifient la configuration et la structure du réservoir (CASTANY, 1982), composé des matériaux présentant des porosités permettant de se laisser traverser par l'eau. Ces ensembles sont caractérisés par une capacité d'accumulation en eau forte.

Les formations hydrogéologiques perméables du bassin versant de l'oued de Srou sont constituées des calcaires dolomitiques et des formations quaternaires récentes sous forme d'alluvions.

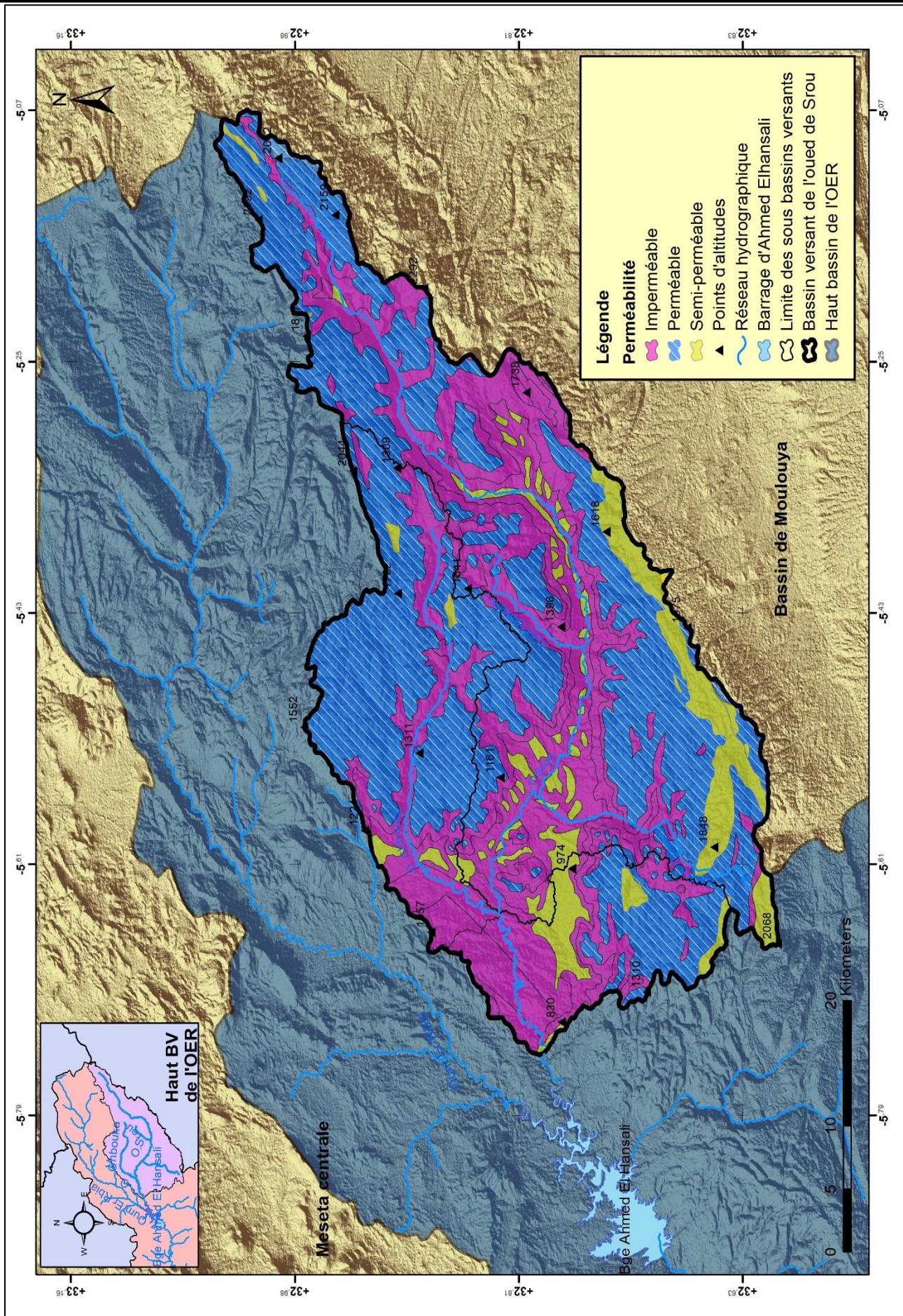


Figure 1-10: Carte de la perméabilité du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016 & Feuille de Rabat 1/500000)

Les formations carbonatées sont formées par deux séries de calcaires qui sont omniprésents dans la totalité du bassin versant de l'oued Srou, et ils couvrent plus de 47 % de superficie ; une se présente comme succession de petits lits calcaires peu épais (entre 20 et 60 cm), alors que l'autre existe sous forme de bancs calcaires à l'échelle métrique (SERBOUT, 2001).

Les formations datées du Pléistocène (Quaternaire récent), se présentent sous forme d'alluvions anciennes qui elles même sont formées de matériel très hétérogène avec des galets mal roulés de dolomies, de grès et de basaltes. Le tout est pris dans une matrice d'argilite et de limon rose pâle ou blanchâtre riche en calcaire. Cette structure forme des terrasses dans la haute vallée de l'oued Srou. Ces formations n'ont pas de capacité d'accumulation car elles ne font que drainer les eaux de ruissellement.

Cette structure géologique perméable entraîne une certaine pérennité de l'écoulement et le soutient des débits, même en période des étiages dans le bassin. En revanche, il témoigne de l'incidence d'une nappe souterraine (sources et suintements) qui peut participer au ralentissement de la sécheresse hydrologique (NEJJARI, 2002) lorsque la sécheresse climatique est bien ressentie.

2.2. Ensembles lithologiques peu perméables

Ces formations sont constituées des formations perméables intercalées des couches imperméables, ou parfois des formations géologiques ne facilitant pas une infiltration rapide des eaux. Il s'agit essentiellement des calcaires-marneux, marnes gréseuses et des grès du Lias moyen et supérieur, des conglomérats, des marno-calcaires et des grès du Dogger et des intercalations des calcaires et marnes du Crétacé.

Cette classe représente 11,2 % de la superficie totale du bassin versant. Ces formations affleurent au sud du bassin et sur la partie aval du lit de l'oued de Srou.

Les formations du calcaire marneux possèdent une capacité aquifère limitée à cause de la présence des marnes imperméable, qui par leur présence, limitent la puissance des aquifères calcaires.

2.3. Les ensembles lithologiques imperméables

Dans cette catégorie, se trouve les formations schisteuses du Paléozoïque, les argiles, les marnes et les basaltes doléritiques du Permo-Trias

La zone sud-ouest du bassin versant de l'oued de Srou appartient à la bordure sud-est de la Meseta centrale. Cette dernière est connue par la dominance d'une couche de 10 m des schistes jaunâtres relativement altérés et argileux, traversés de temps en temps par des filons de quartz

(Serbout, 2001). Entre 10 et 40 m, ces formations redeviennent plus compactes et plus résistantes. Les fractures des couches schisteuses disparaissent avec la profondeur. Au sein de ces formations primaires, des barres de quartzites imperméables sont trouvées.

Les formations Permo-Triasique se connaissent parfaitement par leurs colorations rouge d'argile et brunâtre des basaltes. Cette série domine largement la vallée de l'oued Srou avec une épaisseur qui varie entre 150 et 300 m.

2.4. La perméabilité par sous bassin versant

Le sous bassin versant de l'oued Srou amont présente une hétérogénéité lithologique et hydrogéologique remarquable (Figure 1-11). Une partie importante de sa superficie est imperméable (42 %). Des argiles gypsifères, des marnes et des basaltes dolorétiques du Permo-trias occupent les larges dépressions dans lesquelles l'oued de Srou creuse leur vallée. Cependant, les formations calcaires et calcaire-dolomitiques du Lias qui constituent les différents fragments du plateau de Srou forment les aquifère du bassin (43 %). Ceci présage un soutien moyen et favorise plus les ruissellements.

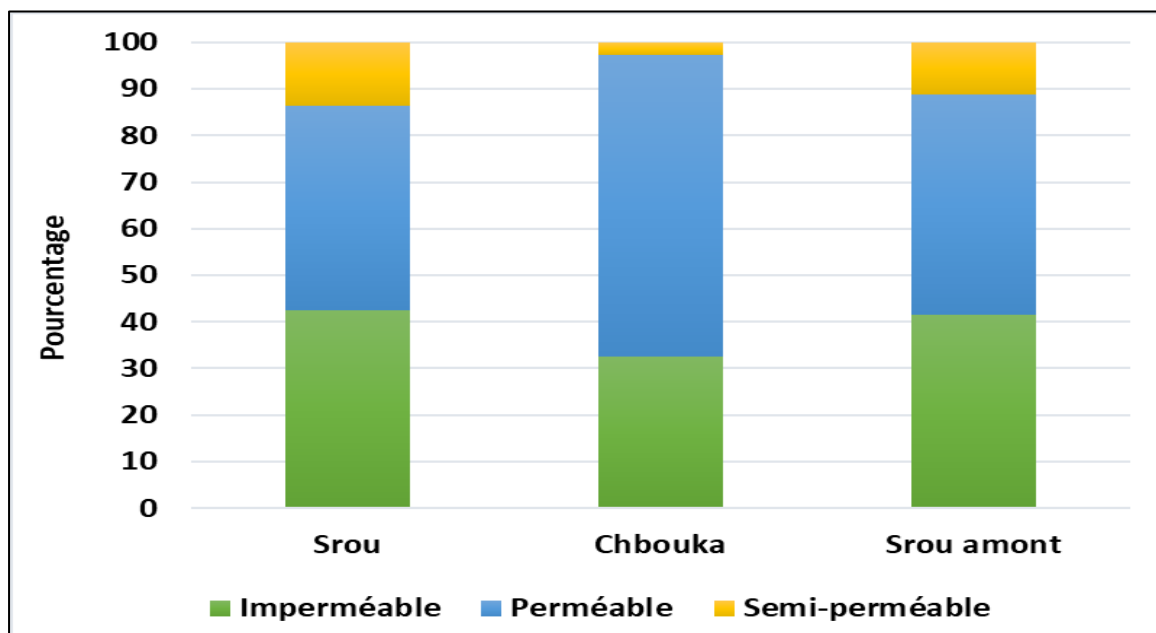


Figure 1-11 : Perméabilité (en %) des formations lithologiques du bassin versant de l'oued de Srou et de ces principaux sous bassins

Cependant, le sous bassin versant de l'oued de Chbouka est dominé par les formations calcaire-dolomitique perméables (65 %). Cette dominance assure un écoulement important surtout en période d'étiage malgré leur petite superficie par rapport à celui du bassin de Srou. Dans la partie aval du bassin juste avant la confluence avec l'oued de Srou, le Chbouka a creusé

son lit dans les formations schisteuses fracturées. Ces dernières n'exercent aucune influence importante sur le rendement hydrologique du bassin.

3. Couvert végétal dans le bassin versant de l'oued de Srou

L'occupation des sols est une variable fondamentale pour la planification régionale ainsi que pour l'étude et la compréhension de l'environnement (FOODY, 2002). En effet, les quantités de précipitations, qui conditionnent la ressource en eau d'un bassin versant, sont redistribuées à la surface du sol en fonction des propriétés à la fois des sols et des couverts végétaux (QADEM, 2015). Donc, la nature du sol et son occupation détermine le bilan hydrologique. L'évapotranspiration se change entre agriculture irriguée et agriculture Bour ou végétations naturelles. C'est ainsi que l'occupation du sol est étudiée comme « pouvoir répartiteur » et comme moyen qualitatif d'évaluation de la pression humaine sur le bassin versant. Qui plus est, dans un cadre prospectif.

La présente étude est le résultat d'une synthèse cartographie à partir des documents suivants : les cartes topographiques au 1/50000 de la zone, une image du logiciel Google Earth, géoréférencée, les données SIG provenant du Centre de la Conservation et du Développement des Ressources Forestières de Khénifra (CCDRF). Plusieurs classes d'occupation des sols ont été identifiées dans la zone d'étude (Figure 1-12).

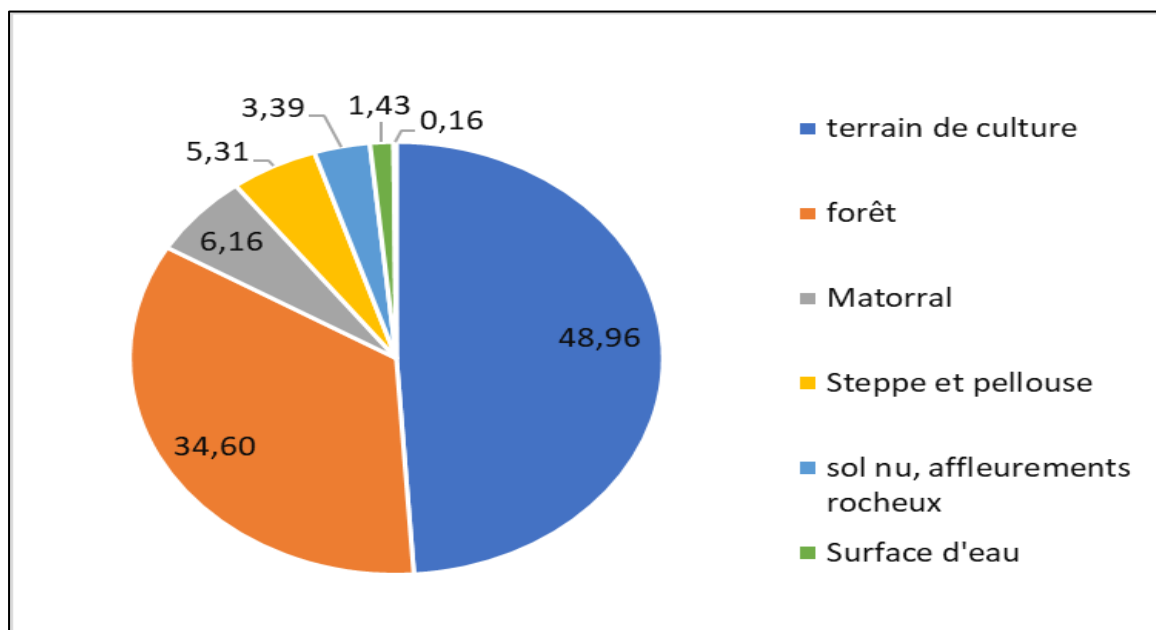


Figure 1-12 : Occupation du sol dans le bassin versant de l'oued de Srou

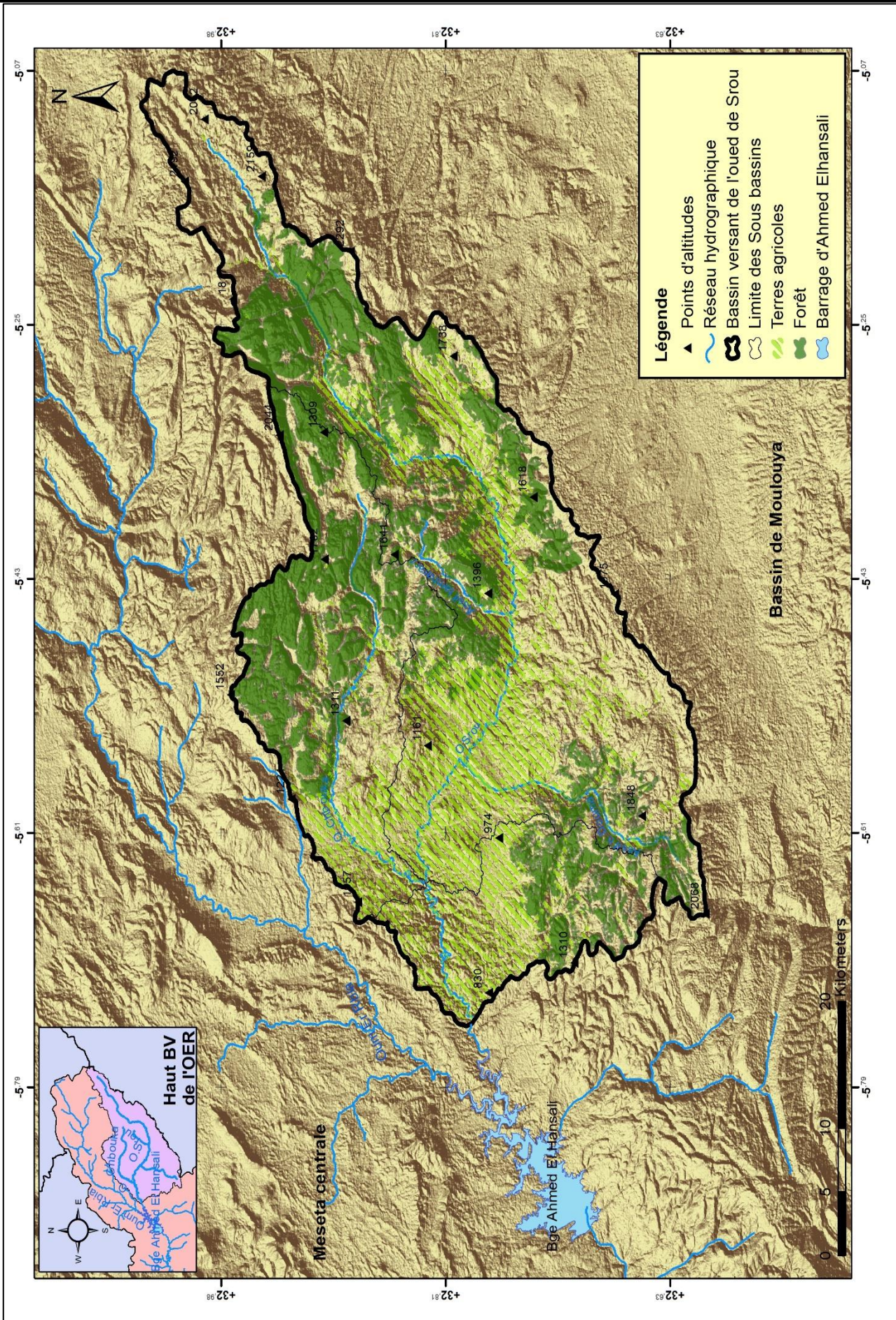


Figure 1-13: Les principales forêts du bassin versant de l'oued de Srou (Mnt. 2016 & Données CCDRF)

3.1. Principales forêts du bassin versant de l'oued de Srou

La répartition des forêts est fort contrastée en raison des variations topo-climatiques qui déterminent un certain nombre « d'étages bioclimatiques » (SAUVAGE, 1963). La végétation forestière s'étend sur 49676,7 ha, soit 34,6 % de la région d'étude. De l'amont vers l'aval du bassin on trouve six domaines forestiers : les forêts d'Ajdir, Kerrouchen et Sanwal qui constituent les forêts des hauts reliefs, les forêts de Tafechna, Taskert et d'Ait Ishak qui se situent sur des terrains assez accidentés à des altitudes où il y'a davantage d'humidité. La forêt occupe plus de 63 % de la superficie du sous bassin versant de l'oued de Chbouka (Figure 1-14).

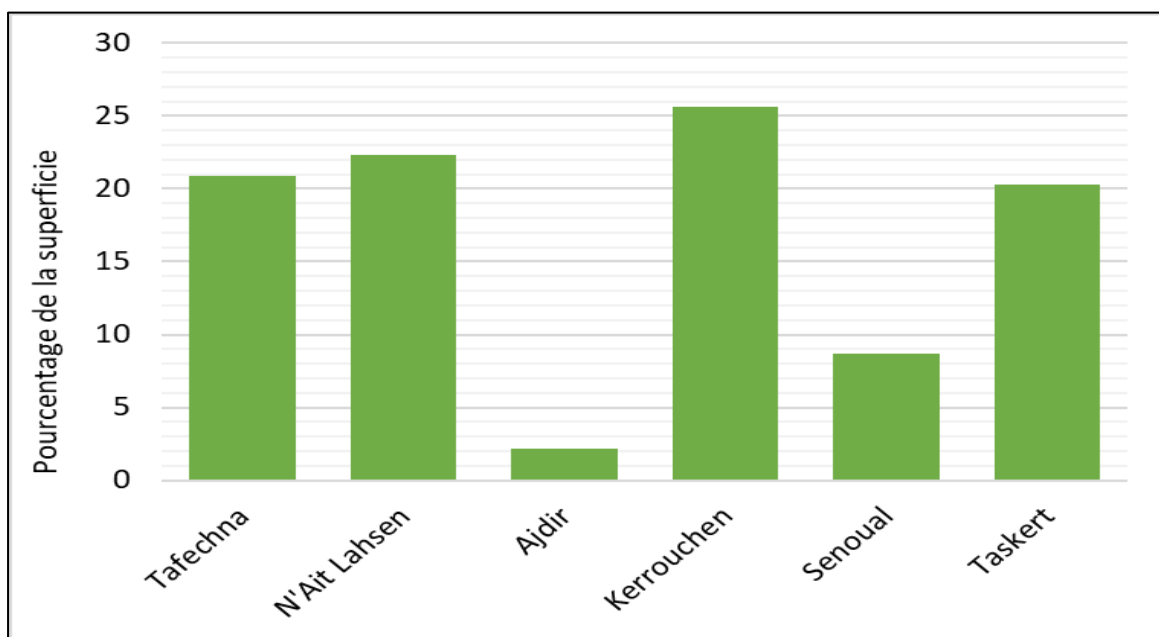


Figure 1-14 : Pourcentage des forêts du bassin versant de l'oued de Srou de la superficie forestière totale

Parmi les espèces les plus importantes qui domine dans la région du bassin versant de l'oued de Srou, on trouve le chêne vert et le cèdre.

- Le cèdre (*Cédrus atlantica*) ; domine les sommets frais et humides de pente forte et de lithologie calcifère, dans les forêts de Senoual et d'Ajdir (entre 1750 et 2300 m). On peut le trouver également dans la partie basaltique du bassin à partir de 1800 m (forêt de Kerrouchen).

- Le chêne vert apparaît sur les secteurs supérieurs à 1000 m qui correspondent à l'étage sub-humide. Cet étage coïncide avec le cause où les précipitations sont moyennement abondantes (700 à 900 mm/an). Le domaine de chêne vert s'étale jusqu'à 2000 m d'altitude, là où le cèdre, déjà présent à partir de 1500 m, continue à subsister.



Figure 1-16: Photos des espèces dominants dans les forêts du bassin versant de l'oued de Srou : le cèdre (photo à gauche) et le Chêne vert (photo à droite)



Figure 1-15 : Changement de la densité du couvert végétal entre le nord-est du bassin (forêt de Kerrouchen photo à gauche) et au sud-est (forêt d'Ait Lahsen à droite)

3.2. Matorral

En s'enfonçant vers le sud, avec une altitude comprise entre 800 et 1100 m, l'étage semi-aride s'étend sur la vallée inférieure du bassin versant de l'oued Srou. Cet étage reçoit des précipitations relativement modestes (600 à 700 mm/an). Le surpâturage et le défrichement y réduisent le potentiel végétal à un matorral discontinu (taux de boisement inférieur à 15%). Le laurier rose et le caroubier parsèment le fond des vallées. Le genévrier, le thuya, le jujubier et le palmier nain émaillent les pentes basses.



Figure 1-17: Les matorrals entre Lakbab et Kerrouchen (photo à droite) et en aval du Srou (photo à gauche)

3.3. Steppe et la pelouse

Ce sont des formations végétales basses composées principalement de steppes et de pelouses à xérophytes épineux, à chamaephytes ligneux et armoise. Elle représente au sein du bassin global de Srou un pourcentage de 18 %. Ces formations occupent les dépressions et les zones de pâturages pour les troupeaux. On les trouve également sur les sommets (dépassent 2000m) qui dominent la vallée de l'oued Zad au nord Est du bassin et au sud-ouest sur les formations schisteuses du plateau central.



Figure 1-18: Photos des terrains de pâturage au nord-est du bassin versant de l'oued de Srou (photo à gauche) et au sud-ouest (photo à droite)

3.4. Terrains agricoles

L'activité agricole dans le bassin du Srou trouve des conditions climatiques et topographiques peu favorables (pluies irrégulières et torrentielles, grêle, excès thermiques, relief accidenté, sols pauvres...).

Les terrains cultivés et les terrains nus (sans couverture végétale tel que les bad-lands) représentent presque 51 % de la superficie du bassin. Elles sont concentrées dans la vallée inférieure et moyenne du bassin versant de l'oued de Srou autour des principales sources et dérivations des cours d'eau. Les sols de ces terrains se développent sur des marnes et des argiles rouges du Trias ainsi que sur les dolomies du Lias. Domaines du haut, moyen et bas versant de l'oued de Srou, elles sont constamment lessivées et appauvries par l'érosion hydrique.



Figure 1-19: Paysages agraires à la large vallée de Srou à côté de Ikbab

3.5. Impact du couvert végétal sur l'écoulement

L'écoulement et le bilan hydrologique au sein des bassin versant sont modifiés chaque année ; car la végétation et les activités humaines (l'agriculture en particulier) exercent une influence considérable sur le rendement en consommant une bonne partie de l'eau rapportée par les précipitations.

Dans le bassin versant de l'oued de Srou, la présence ou l'absence du couvert végétal agit directement sur l'écoulement, tout en exposant le sol à toutes les formes d'érosion hydrique. En fonction de la densité de la végétation on peut subdiviser le bassin en trois parties :

Les sommets et les hautes vallées au nord et au sud-est : ce sont les vallées de Zad et celles d'Assif N'douma. Toutes ces vallées sont perchées à une altitude moyenne d'environ 1800 m et possèdent une forte pente. Ces sommets sont dominés par les steppes et les pelouses qui poussent sur un substratum marneux, calcaro-marneux et argileux. On peut également trouver quelques enclaves forestières formées essentiellement des chênes verts, de genévrier et de chêne zèen. Ces formations lâches, en plus du substratum facilement érodable de pente forte et la pluviométrie importante dans la région favorise le ruissellement de surface et provoque une dégradation du sol au niveau des hautes reliefs.

La deuxième zone est celle de la forêt dense d'Ajdir, de Senoual et Kerrouchen. Malgré la pente relativement forte et la pluie abondante dans ce domaine, l'érosion hydrique reste faible. En effet, une couverture végétale importante et une lithologie de base calcaro-dolomitique favorisent l'infiltration et le ruissellement souterrain.



Figure 1-20: Sommets d'Assif Zad dégradées par l'érosion hydrique

La troisième zone est celle de la partie inférieure et intermédiaire du bassin versant de l'oued de Srou, c'est la partie où le couvert végétal est moins important. Celle-ci est dominée par les formations lâches de steppes et cultures saisonniers. On trouve aussi quelques enclaves de matorral. Avec lithologie composée essentiellement de formations schisteuses imperméables, les précipitations qui tombent sur cette zone, sont totalement destinées au ruissellement de surface.

Conclusion du Chapitre 1 :

Pour conclure, cette étude a montré que le bassin le bassin versant de l'oued de Srou comprend différentes régions naturelles. Les caractéristiques morphométriques et des systèmes de pente montrent une faible différence interne entre les sous-bassins. Les indices varient légèrement entre eux. Les données de l'hypsométrie et de la pente montrent un contraste entre l'amont et l'aval des sous bassins. Une zone des hautes altitudes en amont avec des structures géologiques riches en calcaire et dolomie perméables favorisant l'infiltration et le stockage des eaux fluviales et navales, alors qu'au milieu, la pente devient faible et les formations argileuses du Trias imperméables dominant avec un développement du réseau de ruissellement de surface. D'une façon générale, les formations lithologiques semi-perméables et imperméables occupent une part importante de la superficie du bassin versant de l'oued de Srou, elles dépassent 57 % de la superficie totale. L'ensemble de ces conditions favorisent les ruissèlements que les infiltrations.

Le couvert végétal se caractérise par des variations qui sont en étroite relation avec la variation de l'altitude. En effet, ce sont les hautes altitudes du Moyen-Atlas tabulaire et plissé qui comportent un pourcentage de boisement permanent important. Mais dans la large vallée argileuse de Srou et le plateau central, le couvert devient moins important et clairsemé.

Chapitre 2 : Anthropisation dans le bassin versant de l'oued de Srou



Introduction du chapitre 2

Axe 4 : Caractéristiques humains dans le bassin versant de l'oued de Srou

Axe 5 : Ressources en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou : un potentiel économique et un défi environnemental

Conclusion du chapitre 2

Introduction du chapitre 2

Dans ce travail, il nous semble très important de traiter les aspects socio-économiques de la ressource en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou. L'étude du facteur anthropique d'un bassin versant s'avère important pour en mesurer le poids de l'influence de l'homme sur les ressources en eau, comme le mentionne COSANDEY ET AL (2003) : « *pour évoquer les problèmes de la ressource en eau de façon pertinente, il importe d'avoir une vision concrète et globale du fonctionnement du milieu naturel* ». En effet, la relation réciproque entre l'homme et les ressources naturelles d'un milieu est caractérisée par un comportement interactionnel. Cette relation est traduite par les activités exercées par l'homme, entre autres : l'occupation du sol, l'exploitation des forêts, les pratiques agricoles.... Il s'agit des activités qui s'appuyant sur la ressource en eau, en influencent leur abondance et leur rareté.

Le premier axe de ce chapitre sera consacré à l'étude du contexte sociologique et démographique du bassin versant de l'oued de Srou et les mutations profondes qui sont liées à la croissance démographique. Alors que dans le deuxième axe nous allons traiter les potentialités économiques du bassin ainsi leurs impacts sur la ressource en eau.

Axe 4 : les caractéristiques humaines du bassin versant de l'oued de Srou

L'homme joue un rôle important dans les milieux naturels, et en particulier dans les bassins versant. Il agit sur les écoulements avec différentes façons : prélèvements, déviations, stockages...etc. c'est pourquoi l'étude hydrologique complète doit prendre en considération le facteur humain.

Depuis l'ancien temps, l'homme cherche à s'installer autours des ressources en eaux, car l'eau est un élément vital pour lui et ses activités, en influencent leur abondance et leur qualité. De même, les aménagements hydrauliques perturbent largement l'hydrologie des cours d'eau, par leurs effets de laminage qui jouent un rôle évident et déterminant dans la perturbation du comportement hydrologique naturel des rivières (TAOUS, 2005).

Dans l'optique de déterminer l'impact de l'homme dans le bassin versant de l'oued de Srou, on va étudier le contexte démographique de la zone, en jetant un éclairage sur le processus d'anthropisation et d'installation humaine sur l'espace en question, tout en mettant l'accent sur l'utilisation du sol. Ensuite, on va donner un aperçu historique sur l'installation humaine et l'anthropisation dans le Moyen-Atlas

1. Anthropisation : définition, processus et conséquences

Le dictionnaire « le Petit Larousse » définit l'anthropisation comme « *le processus par lequel les populations modifient ou transforment l'environnement naturel (La déforestation, l'élevage, l'urbanisation et l'activité industrielle sont parmi les principaux facteurs d'anthropisation)* ». Alors que le dictionnaire de l'environnement donne la définition suivante pour le mot anthropisation : « *En géographie et en écologie, l'anthropisation est la transformation d'espaces, de paysages ou de milieux naturels par l'action de l'homme* ». Donc, on peut dire que l'anthropisation est l'action de l'homme dans un espace naturel. Autrement dit, elle représente toutes les activités pratiquées par la population humaine dans un bassin versant ainsi que ses répercussions directes et indirectes (érosion anthropique par exemple).

L'interaction homme-nature joue un rôle important dans la modification et l'évolution des écosystèmes du milieu d'une façon positive ou négative. L'homme peut provoquer des dysfonctionnements environnementaux et de multiples phénomènes extrêmes (changements climatiques, défrichement des forêts, dégradation des ressources en eau, érosion agressive...).

L'anthropisation se manifeste dans tous les milieux naturels par la modification du géosystème (biosphère, lithosphère, hydrosphère...), sans toutefois négliger l'impact de

l'exploitation des sous-systèmes et leurs composantes naturels : eau, sol, végétation... (SAMMAA, 2010).

Devant l'explosion démographique que le monde subit dans les dernières années, l'exploitation et l'épuisement des ressources naturelles est en perpétuelle accrue pour satisfaire les besoins.

La région du bassin versant de l'oued de Srou, comme la plupart des régions du Moyen-Atlas Marocain, a connu des changements profonds liés aussi bien aux politiques de l'état, à la croissance démographique de la population et aux changements socio-économiques.

2. Histoire des tribus du bassins versant de l'oued de Srou

Il est extrêmement difficile de dire de quelle manière s'est constitué le peuplement du Moyen-Atlas central (JENNAN, 2005). Selon les historiens, les premières vagues d'installation remontent au XIème siècle, ou avant l'avènement des Almoravides (milieu du Xème siècle).

La population du bassin versant de l'oued de Srou appartient à la grande tribu d'Ichkern, qui est une sous confédération des Ait Oumalous répartis en cinq grandes tribus Imzinatén, les Ait Yacoub Ou Issa, Ait Mechane (ElKbab) les Ait Hmad Ou Issa, Ait Ishak et d'Aït Ihand (Kerrouchen) (Figure 2-1).

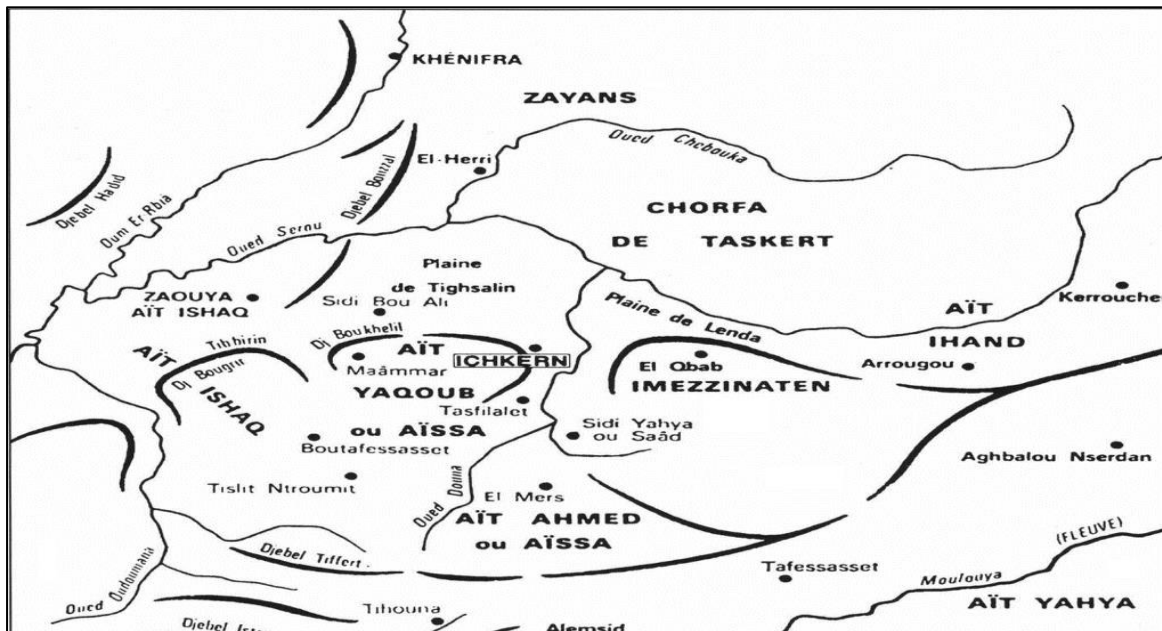


Figure 2-1: Les majeurs tribus de la région Khénifra y compris celles du Bv de Srou (Drouin, 1975)

Ces tribus ont bénéficié de la situation stratégique du bassin, de la richesse et des potentialités naturelles pour s'y installer et pratiquer le nomadisme, la transhumance (la montagne en été et la plaine en hiver) et la vie pastorale sous des tentes. Ce mode de vie a contribué au maintien

de l'équilibre entre les besoins des populations et des troupeaux et les potentialités du milieu, jusqu'au début du 20^{ème} siècle. Avant les grandes mutations socio-économiques qu'a connues la région, l'espace fonctionnait au rythme des saisons, dans un mouvement continu des populations et des troupeaux entre la moyenne montagne et les pâturages peu élevés et utilisables durant la saison froide (NEJJARI, 2002).

Après, l'indépendance en 1956, les choses ont changé, avec la création d'enceintes de marchés hebdomadaires, d'écoles, de dispensaires, de maisons forestières (avec ce que cela suppose comme interdictions de coupe et de ramassage) et d'autres bâtiments marquant l'emprise de l'état. Il convient d'y ajouter les routes reliant Lkbab aux centres voisins de Kerrouchen et de Khénifra, sans oublier la célèbre RP 33 (*Abrid trant-trwa*, de la tradition orale), qui assure la liaison Moulouya/Tadla. Ceci a conduit à la sédentarisation et l'élargissement des espaces irrigués comme le souligne TAG (1996) : « *les espaces pastoraux se vident progressivement au profit des vallées et des plaines riches en eau et en cultures. Il en est de même pour les douars les plus isolés de la montagne* ». La sédentarisation est une tendance de plus en plus forte, qui a été socialement sélective, en touchant les groupes sociaux en fonction de leurs conditions économiques (BEKKARI, 2009). En effet, une partie de la population a trouvé les moyens pour faire de l'agriculture une nouvelle alternative, les autres ont continué à combiner entre l'élevage et l'agriculture. Tout cela a causé une forte pression sur les ressources en eau d'autant plus grande que les besoins des populations vont également augmenter et que le contexte pluviométrique de ces trente dernières années tend plutôt à la sécheresse.

Du fait de la forme et de la qualité de leur habitat, ainsi que par la proportion des ruraux dans leur population totale, les centres urbains du bassin versant de l'oued de Srou apparaissent comme de gros centres ruraux, animés principalement par l'activité du souk (marché hebdomadaire) et la pratique de l'agriculture. Ces villes, qui remplissent le rôle du chef-lieu de commune, abritent des services administratifs, des écoles, parfois un collège et même un lycée, des centres de santé, des mosquées, des bains publics, un tribunal, un abattoir, etc. Ces villes sont des refuges pour les ruraux, en particulier les paysans sans terre, en voie d'émigration vers des villes plus grandes (ELJIHAD, 2005). La ville de Lkbab (le nom signifie les coupoles), aux ruelles en pente, est accrochée à flanc de montagne, soit le plus vieux centre urbain du bassin du Srou (classé urbain dès 1960 avec 2633 habitants), son site montagneux défavorable et sa situation décalée par rapport aux grands axes routiers ont induit un développement assez lent. Le souk de Lkbab est très animé en été, surtout pour les transactions de bétail

3. Caractéristiques démographiques du bassin versant de l'oued de Srou

Administrativement, le bassin versant de l'oued de Srou s'étale sur 13 communes, dont deux sont des centres urbains ; appartenant à deux provinces ; Khénifra et Ifrane. On note que les limites communales ne correspondent pas aux limites topographiques des bassins. Pour cela on calcule la part de la superficie communale qui appartient à notre bassin (Figure 2-2)

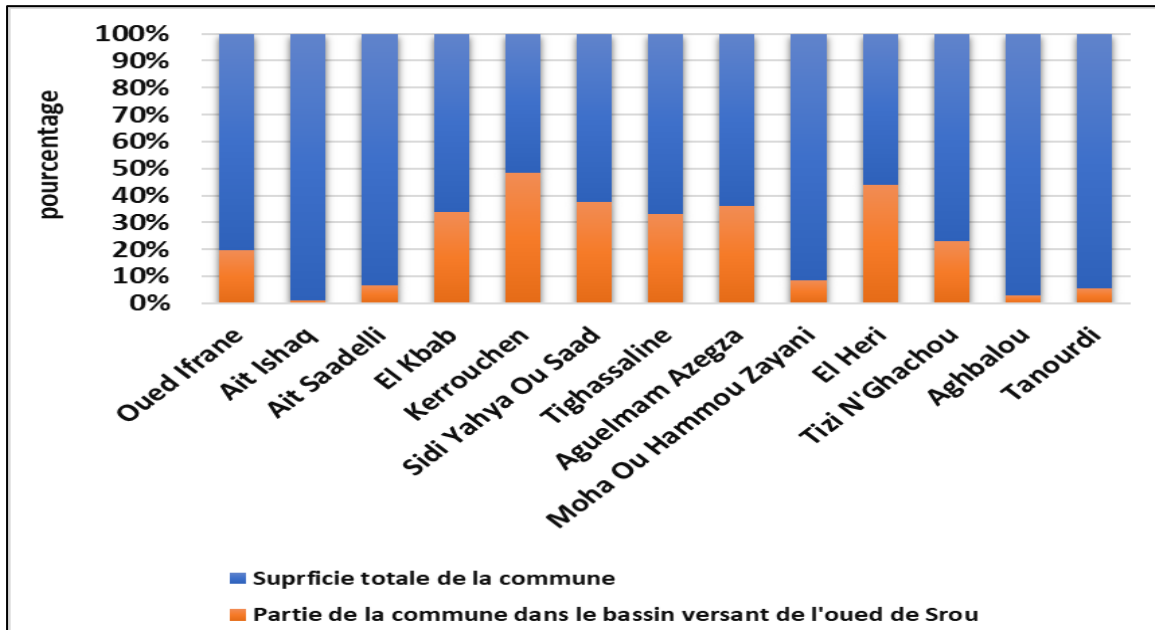


Figure 2-2 : Superficie des communes qui appartient au bassin versant de l'oued de Srou

Le Moyen-Atlas n'a été jamais peuplé (JENNAN, 2005). Il a été un pays presque vide utilisé comme pâturage d'été par quelques tribus (LÉON L'AFRICAIN, 1550). C'est à la fin du 18^{ème} siècle que s'est produit le grand mouvement à la suite duquel les tribus ont occupé la partie centrale du Moyen-Atlas, poussant ainsi vers les plaines du nord-ouest d'autres tribus d'origine arabe ou berbère.

En 1960, la densité y est toujours faible (12 hab/km²), les chiffres sont voisins pour la plupart des tribus qui s'y trouvent (NOIN, 1970). Aujourd'hui, cette densité (27,5 hab/ km²) est encore largement inférieure à celles des montagnes voisines comme le rif par exemple, 120 hab/ km² (GROVEL, 1996).

Il est aussi établi que le Moyen-Atlas est une région montagneuse différente des autres milieux montagnards marocains par son peuplement relativement récent, sa faible densité humaine (inférieure à la moyenne nationale), ses ressources naturelles variées (eau, forêt mines) et sa situation de zone de passage (JENNAN, 2004).

Le bassin versant de l'oued de Srou compte une population d'environ 49074 habitants

dont plus de 54 % habitent les grands centres du bassin : Lkbbab, Kerrouchen, Tighassaline, Ait Ishak et Sidi Yahia o Saad.

L'évolution de la population à l'échelle des communes du bassin versant de l'oued de Srou est marquée par des contrastes. En effet, les recensements généraux de la population et de l'habitat entrent (1994 et 2004) ont montré que la population de la zone d'étude a connu une augmentation remarquable avec un rythme bouleversé.

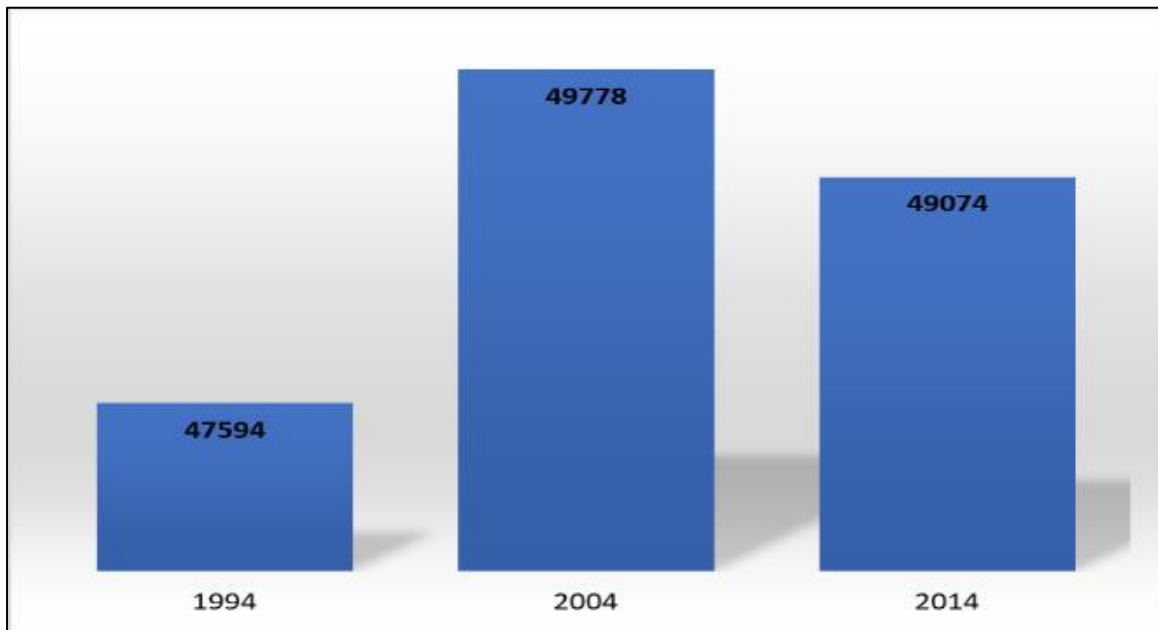


Figure 2-3: Evolution de la population du bassin versant de l'oued de Srou (RGPH 1994, 2004 et 2014)

En 1994, le nombre d'habitants dans le bassin versant de l'oued de Srou était de 47594, avec une densité de 35 hab /km². Cette densité est inférieure à la moyenne nationale de l'époque, 37 hab/km². Ce chiffre passe à 49778 habitants en 2004. Actuellement, le nombre d'habitants connaît une régression marquée, la population passe à 49074 avec un taux d'accroissement négatif (recensement 2014) (Figure 2-3).

Les centres ruraux du bassin versant de l'oued de Srou sont marqués par des taux d'accroissement important. Cela signifie que l'accroissement naturel des régions rurales a été absorbé par les centres ruraux tels qu'Ait Ishak, Tighassaline, Lkbbab et Sidi Yahia o Saad. Cependant, actuellement ces centres sont multipliés, leur mode de vie reste souvent rural et la population s'appuie toujours sur les revenus agropastoraux.

Cependant, dans le bassin, on note une grande hétérogénéité dans le taux d'accroissement entre les communes. En effet, la concentration de la population se fait surtout sur les sites favorables à la pratique des activités agricoles, soit le long des oueds de Srou, de Chbouka et des cuvettes et à proximité des sources. Cependant, les zones de montagnes ont une faible densité de population. L'évolution démographique et les différences entre les communes

sont données dans le tableau suivant :

Tableau 2-1: Evolution démographique de la population dans les communes du bassin versant de l'oued de Srou (RGPH : 1994, 2004 et 2014).

| Commune | Population en | | |
|-----------------------|---------------|------|------|
| | 1994 | 2004 | 2014 |
| Oued Ifrane | 2425 | 2706 | 2651 |
| Ait Ishaq | 5832 | 6137 | 5983 |
| Ait Saadelli | 192 | 192 | 186 |
| Lkbab | 8328 | 8589 | 8294 |
| Kerrouchen | 5417 | 5273 | 6574 |
| Sidi Yahya Ou Saad | 4535 | 5136 | 4231 |
| Tighassaline | 5977 | 7012 | 7571 |
| Aguelmam Azegza | 5188 | 4988 | 4346 |
| Moha Ou Hammou Zayani | 964 | 1012 | 876 |
| Elhri | 7445 | 7401 | 7134 |
| Tizi N'Ghachou | 899 | 916 | 767 |
| Aghbalou | 223 | 254 | 293 |
| Tanourdi | 171 | 161 | 167 |

La carte ci-après (Figure 2-4) présente la variation de la densité de la population dans les communes du bassin versant de l'oued de Srou en 2014. Les données indiquent que les centres urbains sont les plus peuplés avec une densité dépassant les 2000 habitants/km². Cependant, cette différence de la densité entre les communes n'est pas totalement liée à la différence entre le taux de mortalité et de natalité, mais, il existe d'autres facteurs qui interviennent entre autres : l'augmentation du taux d'immigration (exode rural) qui est due essentiellement à la nature attractive de quelques zones du point de vue agricole (les opportunités du travail offertes par le secteur primaire (agriculture), ou socio-économique (les activités commerciales, la scolarisations...)).

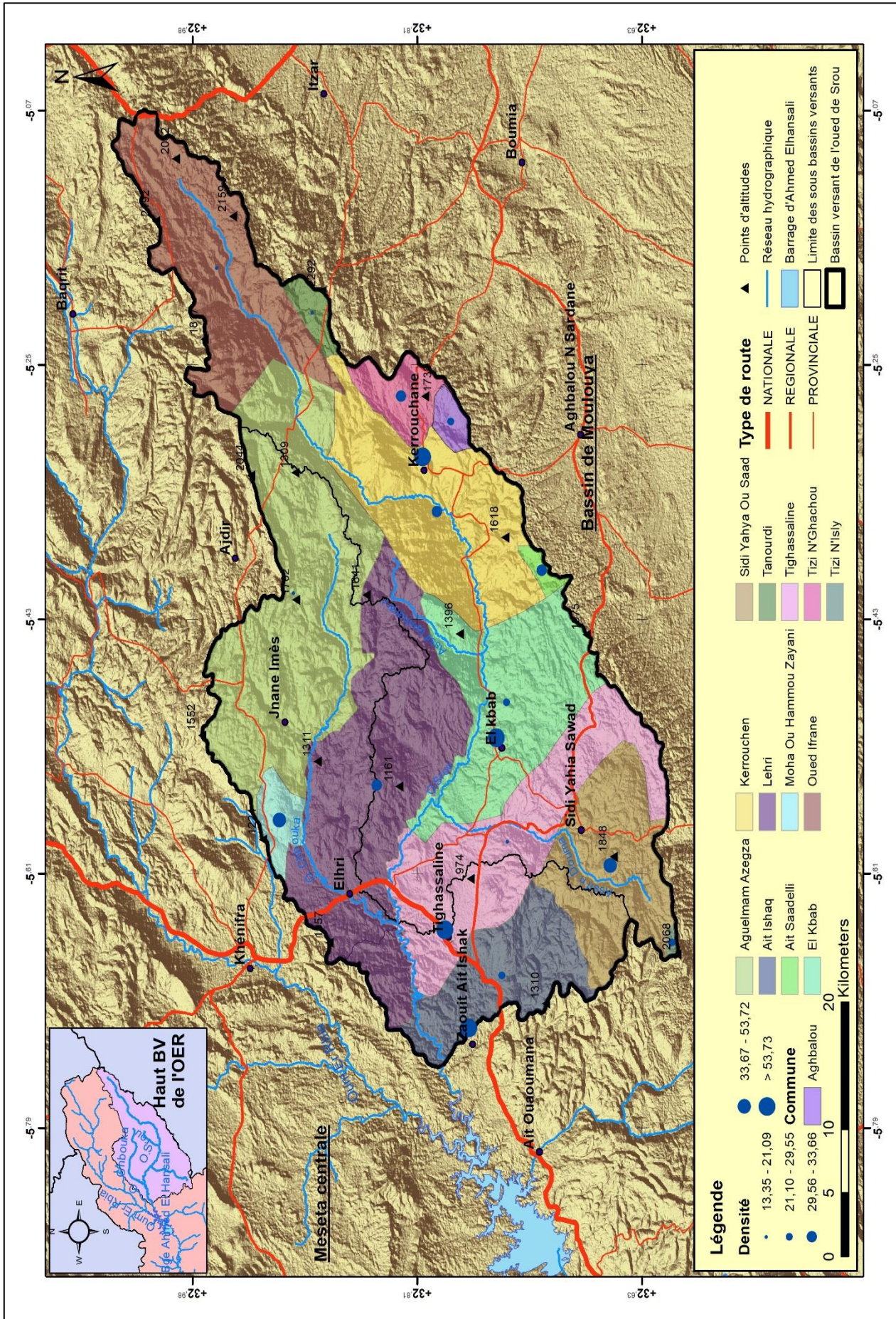


Figure 2-4: Variation de la densité de la population dans les communes du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)

Axe 5 : Ressources en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou : un potentiel économique et un défi environnemental

L'eau dans le bassin versant de l'oued de Srou constitue le principal moteur des activités économiques de la région. En effet, toutes les activités économiques y sont liées à la richesse hydrologique. L'agriculture, la richesse forestière, les carrières, le potentiel important dans le secteur de l'élevage, sites touristiques naturels d'une rare beauté sont tous dépendent de l'eau.

1. Agriculture dans le bassin versant de l'oued de Srou

La zone d'étude relève de la zone d'action de la DPA du Khenifra, et plus précisément, du CT de Khénifra et de Ben Khilil. Les superficies irriguées sont importantes au voisinage des cours d'eau douces. Le statut juridique Melk (privé) des terres agricoles est dominant ; toutefois le statut collectif occupe des surfaces importantes aussi. Les exploitants agricoles emploient la main d'œuvre salariée permanente et la main d'œuvre familiale, le reste des exploitants utilise la main d'œuvre occasionnelle. La vocation de la zone est l'oléiculture, la céréaliculture et l'élevage.

➤ L'oléiculture : elle constitue la principale activité agricole en irrigué de la zone de d'étude. Elle couvre une superficie importante. La production d'olives et d'huile d'olives est importante ; destinée en grande partie à la commercialisation.

➤ La sole céréalière en Bour principalement ; elle est composée essentiellement de blé dur et d'orge. La production céréalière est destinée en grande partie à l'autoconsommation ;

➤ Les autres spéculations occupent de faibles superficies : légumineuses, cultures fourragères, cultures maraîchères dans les hauts sommets et au voisinage des cours d'eaux permanents.

➤ L'élevage est très important dans la zone surtout en amont du bassin versant. Les agriculteurs possèdent un cheptel important et diversifié, formé de bovins (locaux, croisés et purs), ovins, caprins et animaux de trait. L'élevage est également pratiqué comme activité complémentaire à l'agriculture (Tableau 2-2).

Tableau 2-2: Effectif du cheptel (en millier de tête) au niveau des communes rurales du bassin versant de l'oued de Srou

| Commune | Bovins | Ovins | Caprins | Chevaux | Mulets | Anes | Total |
|--------------------|--------|-------|---------|---------|--------|------|-------|
| Ait Ishak | 0,9 | 16,9 | 10,2 | 0,2 | 0,8 | 0,7 | 29,7 |
| Ait Saadalli | 0,3 | 6,5 | 0,1 | 0,7 | 0,2 | 0,1 | 7,3 |
| LKbab | 1,4 | 21,0 | 3,6 | 0,2 | 0,9 | 0,6 | 27,8 |
| Kerrouchen | 0,6 | 7,5 | 3,4 | 0,8 | 0,8 | 0,4 | 12,8 |
| ELhri | 1,3 | 21,5 | 7,1 | 0,2 | 0,8 | 0,7 | 31,7 |
| Sidi Yahya ou Saad | 0,6 | 15,8 | 7,2 | 0,3 | 0,9 | 0,7 | 25,4 |
| Tanourdi | 0,2 | 7,5 | 0,9 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 9,3 |
| Tighassaline | 1,0 | 17,9 | 4,5 | 0,2 | 0,6 | 0,5 | 24,7 |
| Total | 7,9 | 152,0 | 47,9 | 1,7 | 6,4 | 4,5 | 220,4 |

* Source : DPA du ministère de l'Agriculture du Développement Rural et des Pêches Maritimes, Khénifra.

Les résultats de l'enquête montrent une structure foncière marquée par la superficie très inégale des exploitations agricoles. Une grande partie des surfaces agricole sont de petite taille. En effet, Les parcelles irriguées dans le bassin ne dépassent pas 1 ha de superficie. Elles sont localisées autours des sources et dans les rives des cours d'eau.

Les exploitations se bénéficient principalement des eaux des sources, des puits et de certains affluents qui ont une salinité modérée.

L'irrigation s'effectue par gravité, du canal principal (séguia) vers le canal secondaire (souvent appelé masref), qui submerge les champs individuels. Dans le bassin versant de l'oued de Srou le réseau de séguias est constitué par deux types, l'un moderne et l'autre traditionnel. Les seguias traditionnelles, en terre, représentent (81 %) du réseau. Depuis la construction de la seguia, un tour d'eau est instauré, et la distribution se fait par une rotation (journalière ou

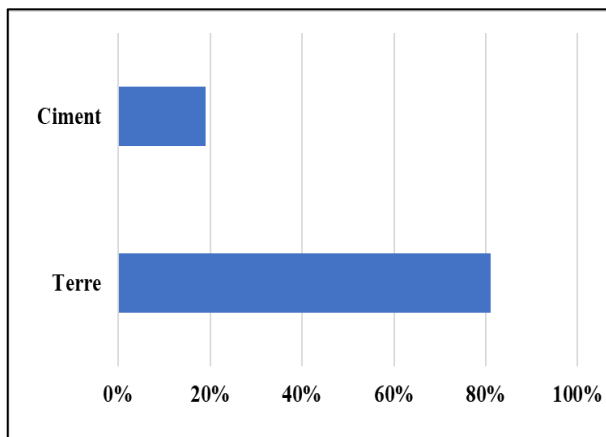


Figure 2-6 : Nature du réseau des seguias dans le bassin versant de l'oued de Srou

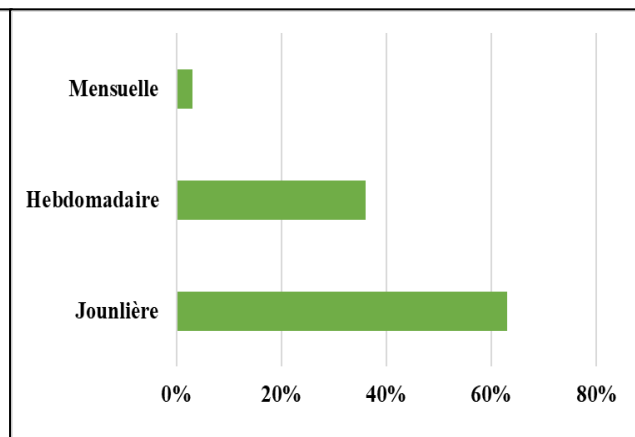


Figure 2-6 : La durée du cycle d'irrigation dans le bassin versant de l'oued de Srou

hebdomadaire) entre les membres du même douar. Le cycle peut aussi dépend du débit et de la superficie du périmètre irrigué.



Figure 2-8: Seguia en béton en fonction



Figure 2-8: Seguia en béton abandonnée

63 % des usagers ont confirmé que le tour d'eau est journalier. Au niveau de chaque douar, la Jmaâ (Takbilt), qui représente le comité de sages, a mis en place une organisation spéciale à sa tête un chef (Amghar ntarga) élu par les ayants. Le rôle principale d'Amghar est l'organisation, la surveillance de la répartition et la résolution des conflits entre les usagers. Les agriculteurs (90 %) ont affirmé sur l'insuffisance de la quantité d'eau du tour durant les dernières années, ce qui ne permet pas d'irriguer toutes les parcelles cultivées d'un agriculteur. Ce problème se renforce surtout en saison des étiages, pour laquelle le débit devient faible. La part (quantité) légale ne suffit pas pour irriguer toutes ces parcelles cultivées. Dans ce cas, la plupart des irrigants se dirigent vers la location ou l'achat d'eaux d'autres propriétaires ou le creusement des puits.



Figure 2-10 : Pompage direct de l'oued de Chbouka



Figure 2-102 : Puit équipé d'une pompe verticale avec un moteur diesel

D'autres agriculteurs recourent aux prélèvements directs des cours d'eau qui ont une salinité modérée, comme le cas de l'oued de Chbouka, l'Assif Tamharrat (Figure 2-11). Le déficit observé dans les eaux des sources et les eaux de surface a poussé les agriculteurs vers l'exploitation des ressources souterraines pour garantir les besoins exigés par la progression des activités de la population. En effet, nous avons détecté plusieurs forages dans la région avec des techniques de pompage puissantes (Figure 2-12). Ce changement dans les pratiques d'irrigation, a engendré une révolution agricole au sein du système traditionnel. En revanche, les forts prélèvements progressent et la succession des années déficitaires en eau entraînent une diminution remarquable de la recharge des aquifères.

On note la présence de quelques domaines d'arboricultures équipés avec des systèmes d'irrigation modernes comme la goutte à goutte, en amont du bassin du Srou et dans la région d'Arroggo.

2. Industrialisation dans le bassin versant de l'oued de Srou

L'industrie demeure absente dans les centres du bassin versant de l'oued de Srou, à l'exception des unités de trituration de l'huile d'olive et un nombre important des carrières de différents types.

2.1. Huileries

L'oléiculture est la première richesse arboricole dans la partie aval du bassin versant de l'oued de Srou. Elle constitue une source de subsistance pour plusieurs familles. Le bassin est caractérisé par une production importante d'huile d'olive. Cette production provoque une grande pollution pour les eaux superficielles et souterraines par les margines. Les visites effectuées sur terrain et les visites pour les services externes des DPA de Khénifra nous ont permis de recenser les unités de trituration qui sont implantées dans la zone. Le bassin versant de l'oued de Srou renferme 90 unités déclarées (DPA).

La filière huile accuse un retard de développement. La production d'huile d'olive est dans un stade dite primitif, elle se base sur un système de trituration en général traditionnel.

Les margines posent de sérieux problèmes de pollution par leur concentration élevée en matières organiques. L'absence de méthodes de traitements adaptées aux besoins des unités de trituration pousse les propriétaires à rejeter ces eaux dans la nature sans aucun contrôle (selon l'enquête).

Pendant la campagne oléicole qui dure approximativement d'octobre à février (4 à 5 mois), la qualité des eaux se trouve très dégradée. Ces margines sont produites en quantités importantes

et rejetée directement dans les cours d'eau ou sur le sol sans aucun contrôle et aucun traitement préalable. Ces rejets nuisent fortement à la qualité des eaux. La très forte charge en matières organiques empêche ces eaux de s'auto-épurer et la pollution peut s'étendre sur de très longues distances et peut être accumulée dans le barrage d'Ahmed Elhansali.

Tableau 2-3 : Caractéristiques physico-chimiques des margine (Amirantes, 1999)

| Paramètres | Valeurs |
|----------------------------|--------------|
| DCO (mgO ₂ / l) | 60000-180000 |
| DBO (mgO ₂ /l) | 20000-55000 |
| pH | 5.0-5.5 |
| Chlorures (mg / l) | 5-6 |
| Phosphates (mg/ l) | 170-190 |
| Azote nitrique (mg / l) | 3-4 |

2.2. Carrières

La zone d'étude est caractérisée par la présence des activités extractives, les carrières, à cause de la richesse en cours d'eau et leurs alluvions qui sont des éléments de base pour la construction. Le bassin versant contient plus de 27 carrières agrémentées par l'état (Tableau 2-4), elles produisent de différents matériaux. La production annuelle de l'ensemble est estimée à 154000 m³ (ministère de l'équipement).

La plupart des carrières dans la zone d'étude ont comme activité principale l'extraction des sables et des alluvions à partir du milieu fluvial. Elles sont actives dans le lit mineur des cours d'eau ce qui provoque des effets néfastes sur la dynamique fluviale.

Tableau 2-4: Présentation des principales carrières du bassin versant de l'oued de Srou (ministère d'équipement, 2012)

| Commune | Nombre | Type matériaux produites | Production en m ³ / an |
|--------------------|--------|--------------------------|-----------------------------------|
| LKbab | 4 | Sable de concassage | 66000 |
| | 1 | Marbre | 500 |
| Aït IshaK | 9 | Sable de concassage | 23500 |
| Sidi Yahya Ou Saâd | 6 | Sable de concassage | 14500 |
| Tighassaline | 7 | Sable de concassage | 49500 |
| Elhri | 1 | Sable de concassage | 60000 |

Les cours d'eau sont avant tout de véritables milieux naturels, ils jouent un rôle de filtre des polluants très important. Leurs richesses et leurs mosaïques sont générées par le fonctionnement géomorphologique des chenaux et des fleuves. Par conséquent toute activité tendant à modifier la morphologie et l'hydrologie peut affecter le fonctionnement du système fluvial, et la richesse biologique qui le caractérise. C'est le cas de l'extraction de matériaux qui change de manière irréversible la forme du lit, et modifie les modalités de transfert des eaux, le cas de la plupart des concasseurs du bassin versant de l'oued de Srou, ce qui agit de différentes façons sur la qualité des eaux.

2.3. Tourisme

Grâce à sa situation géographique stratégique au cœur du Moyen-Atlas, enrichie par l'existence de plusieurs sites touristiques et des milieux naturels variés, la région dispose de potentialités touristiques et d'un cadre propice et incitateur au développement du tourisme qui reste pour l'instant freiné par la faiblesse des investissements, la zone se distingue par :

- Des ressources hydriques très importants ; les sources Arrougo, de Jnan Imas, les lac...
- Un couvert végétal très riche et très dense et très diversifié.
- Une faune diversifiée ;
- Un climat de montagne.

Cependant, ce secteur demeure peu développé et l'infrastructure d'accueil reste très limitée (Peut d'hôtels, absence de routes, et d'aéroports). L'impact des activités humaines sur les ressources en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou.

Conclusion du chapitre 2

L'étude des caractéristiques humaines a mis en évidence une augmentation importante entre 1994 et 2014 et le processus de l'installation humaine dans le bassin versant de l'oued de Srou. Ce processus est accompagné par des mutations au niveau des activités exercées et des modes d'occupation de l'espace. Ce territoire a connu une intensification rapide au niveau de l'exploitation agricole. Les besoins en eau de l'agriculture et des activités anthropiques ne cessent d'augmenter. Ces pratiques exercent une influence directe ou indirecte sur le milieu physique, et plus particulièrement, sur les ressources en eau.

Chapitre 3 : Le problème croissant de la ressource en eau, cadre théorique et méthodologique des étiages hydrologiques

Introduction du chapitre 3

Axe 6 : Problème croissant de la ressource en eau au Maroc et de le bassin versant de l'oued Oum Er Rbia

Axe 7 : Définition et méthodes d'identification des débits d'étiage

Axe 8 : Définitions et méthodes d'identification des tarissements

Conclusion du chapitre 3

Introduction du chapitre 3

La connaissance des débits des étiages est essentielle pour la conception des politiques de gestion et de contrôle des ressources hydriques. L'information concernant les faibles débits est utilisée pour déterminer les débits réservés, planifier les débits de régulation, analyser les impacts environnementaux et économiques, modéliser la qualité, et améliorer le niveau général de compréhension des systèmes naturels. Pourtant, l'étude des sécheresses en termes de durée, d'intensité (volume de déficit moyen) et de sévérité (volume de déficit total) est l'un des aspects le plus négligé en hydrologie, et les articles scientifiques reliés aux crues sont 6 fois plus nombreux que ceux reliés aux sécheresses (DRACUP IN ABI ZEID, 1997).

Dans cette revue de littérature nous allons essayer de mettre en évidence la nécessité des études des étiages dans un contexte hydro-climatique semi-aride à aride comme celui du Maroc. Ce travail sera organisé comme suit :

Dans le premier axe nous allons présenter l'état actuel de la ressource en eau au Maroc et dans le bassin versant de l'oued de l'Oum-Er-Rbia par rapport aux différentes menaces qui y sont exercées. Il dresse un portrait de la nécessité de connaître les débits d'étiage.

Le deuxième axe intitulé, « Définition et méthodes d'identification des débits d'étiage », s'intéresse aux définitions et concepts relatifs aux étiages et la présentation des différents indices utilisés dans la caractérisation des débits d'étiage dans le monde. Ces variables sont nombreuses et peuvent représenter un débit, un volume ou encore une durée. Ces variables sont abordées, mais nous avons choisi les plus réponsus et les plus pertinents, nous essayons de définir le « débit d'étiage » : en répondant à la question délicate : « qu'est-ce qu'un débit d'étiage ? » en introduisant la notion de « débit limite ou débit d'entré d'étiage ».

Alors que, dans le troisième axe « Définitions et méthodes d'identification des tarissements » nous allons essayer de faire le point sur les principales lois appliquées au tarissement des cours d'eau, et aux méthodes de sélection des phases de tarissement. Nous notons qu'au Maroc la sélection des débits de tarissement est rendue facile, surtout car les périodes de tarissement sont longues, et ne sont pas perturber par les précipitations. L'identification des périodes de tarissement est basée sur des critères rigoureux décrits par un algorithme déjà utilisé en France (LANG, 2007). L'identification des débits de tarissement aboutit également à une méthode de séparation des écoulements.

Axe 6 : Problème croissant de la ressource en eau au Maroc et dans le bassin versant de l'oued de l'Oum-Er-Rbia

Depuis de nombreux siècles, les populations du Maroc ont vécu en parfaite symbiose avec le milieu hydrique, sachant tirer profit des années humides et s'accommodant des années de sécheresse en atténuant les impacts, grâce à un sens averti de l'économie dans l'utilisation de l'eau.

Les conditions socioéconomiques de l'utilisation de l'eau ont toutefois notablement changé depuis le début du siècle sous l'effet de l'évolution rapide de la démographie, de l'amélioration continue des conditions de vie des populations, de l'urbanisation accélérée, de l'introduction de l'irrigation à grande échelle et du développement de l'industrie.

Cette évolution socioéconomique rapide a entraîné une pression croissante sur les ressources en eau, consécutive à l'accroissement sans précédent des besoins en eau des secteurs usagers, à la mise en évidence de disparités régionales et à l'apparition de problèmes aigus de pollution de l'eau.

Pour faire face à l'explosion de la demande en eau, qui s'est faite jour dès le début de la seconde moitié du siècle, le Maroc a mis en œuvre des stratégies de développement des ressources en eau qui s'insèrent de manière cohérente dans les politiques nationales de développement économique et social.

Bien que des progrès certains aient été accomplis dans le domaine de l'eau, et que la sécheresse soit une caractéristique majeure du contexte hydrologique du Maroc, son impact sera de plus en plus important avec l'accroissement de la demande et la compétition pour l'accès à l'eau. Les décennies à venir seront marquées par l'impérieuse nécessité de donner autant d'importance, à la gestion de l'eau pendant les périodes de étiages.

1. L'eau au Maroc : potentialité et impact

Situé au Nord de l'Afrique et sur la rive sud-ouest de la mer Méditerranée, le Maroc est caractérisé par un climat de transition entre le climat tranchement méditerranéen à tempéré du sud de l'Europe, et le climat aride des zones désertiques du Sahara.

Soumis aux influences méditerranéennes au nord, océaniques à l'ouest, continentales, puis sahariennes de plus en plus vers l'est et le sud, le climat est principalement caractérisé par un été chaud voire sec et un hiver frais, parfois froid. Durant l'été, les précipitations sont quasiment absentes et l'évaporation particulièrement forte.

L'irrégularité du climat marocain se manifeste par une grande variabilité pluviométrique.

Sachant que cette dernière représente l'unique apport en eau douce renouvelable du pays. Seulement 20 % des précipitations au Maroc sont utiles, soit 29 milliards m³ tenant compte des pertes par évaporation et les écoulements non maîtrisables vers la mer, la disponibilité mobilisable en eau est estimée à 22 milliards de m³ en moyenne, soit 730 m³/hab/an, dont 18 milliards m³ en eaux superficielles et 4 milliards m³ d'eaux souterraines. Sur ces 22 milliards m³, environ 12 milliards m³ sont mobilisés : 3,4 milliards m³ d'eau souterraine et 9,6 milliards m³ d'eau superficielle (SEEE, 2009).

Ces moyennes masquent une répartition très inégale des précipitations dans le temps et l'espace. La sécheresse est un phénomène fréquent au Maroc, les plus marqués sont les sécheresses de (1944-1945, 1981-1985, 1991-1995, 1998-2001 et 2006-2007). On note qu'au cours d'une même année, l'essentiel des débits écoulés se font souvent sous forme de crues souvent courtes et parfois très violentes.

Les ressources en eaux souterraines mobilisables sont estimées à 4 milliards de m³/an (SEEE, 2009). Elles sont réparties sur 130 nappes aquifères dont 32 nappes dites profondes (profondeurs variant de 200 à plus de 1 000 m) et 98 nappes superficielles sont identifiées et répertoriées. Les premières sont difficiles d'accès et entraînent par conséquent un coût de mobilisation et d'exploitation assez élevé. Les secondes sont plus accessibles, mais sont aussi plus vulnérables à la pollution et à la sécheresse. Le tableau (3-1) illustre les différences de répartition des eaux souterraines et les différences de potentiel en eau au niveau des différents bassins hydrauliques du Royaume du Maroc.

Tableau 3-1: Répartition géographique des ressources en eaux souterraines exploitables (SEEE, 2013)

| Bassin versant | Eau souterraine exploitable (Mm ³) |
|------------------------------|--|
| Loukkos | 146 |
| Moulouya | 430 |
| Sebou | 1020 |
| Bouregreg | 76 |
| Oum-Er-Rbia | 350 |
| Tensift | 506 |
| Souss-Massa | 666 |
| Ziz-Guir-Rhéris | 204 |
| Sakua El hamera_Oued Eddahab | 18 |
| Total | 3416 |

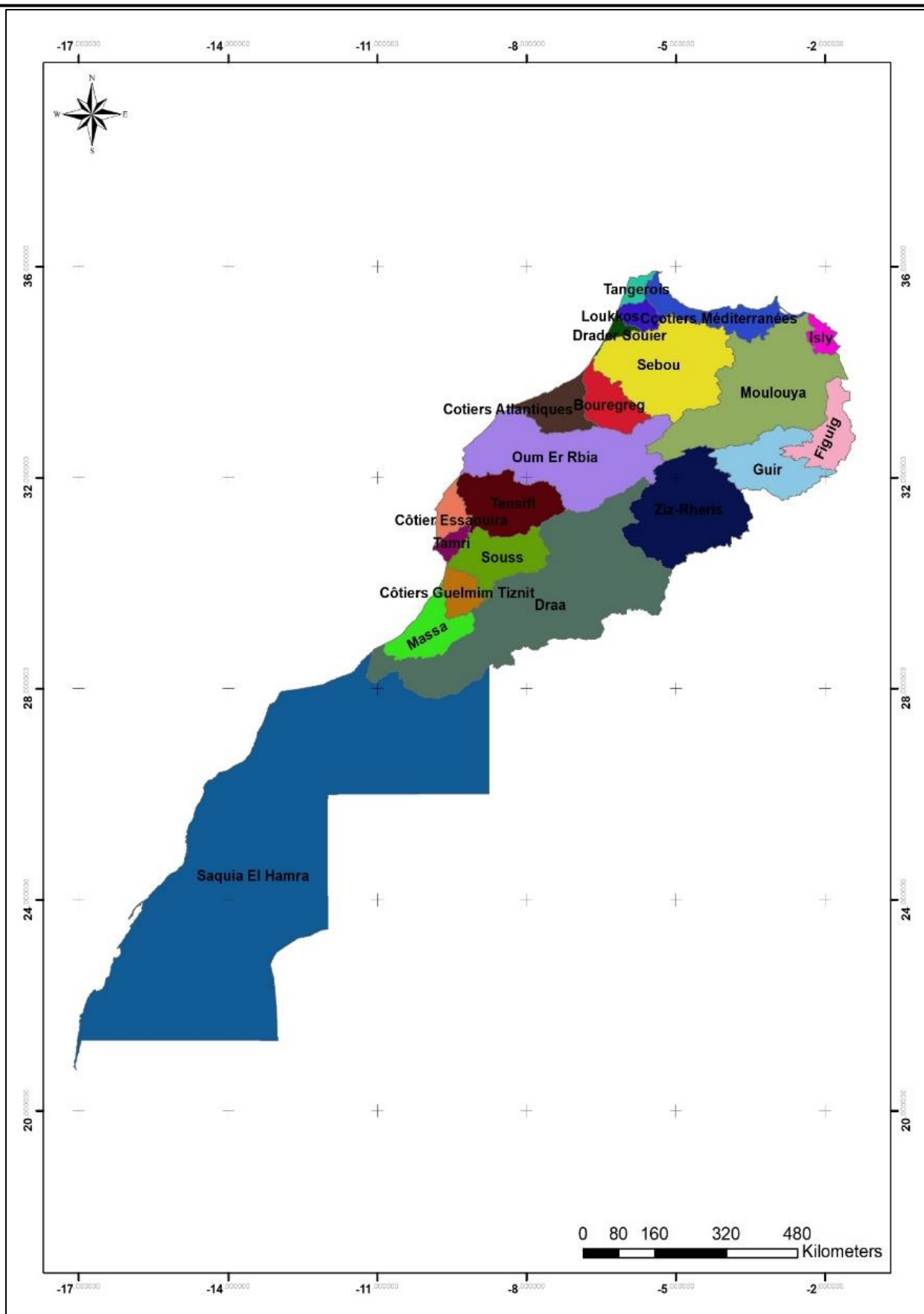


Figure 3-1 : Les grands bassins hydrauliques du Maroc (MNT 2016)

Les ressources en eau souterraines représentent près du tiers, soit 10 milliards de m³, et sont réparties sur une trentaine de grands systèmes aquifères. Seule la moitié de ce potentiel est considérée comme une eau souterraine mobilisable, car près de 3 milliards de m³ constituent le débit de base des rivières et 2 milliards de m³ les écoulements vers la mer.

Les ressources en eau de surface sont marquées par une forte disparité de leur répartition géographique et des régimes hydrologiques très irréguliers à l'échelle saisonnière, annuelle ou interannuelle. Ces régimes hydrologiques sont marqués par des étiages prononcés avec souvent des débits nuls en été, des crues fortes et rapides en saison humide. Ces crues favorisent l'érosion des sols dans l'amont des bassins versants et provoquent des inondations à l'aval. Par ailleurs, l'occurrence d'épisodes secs de durée plus ou moins longue est également une donnée structurelle essentielle des régimes hydrologiques.

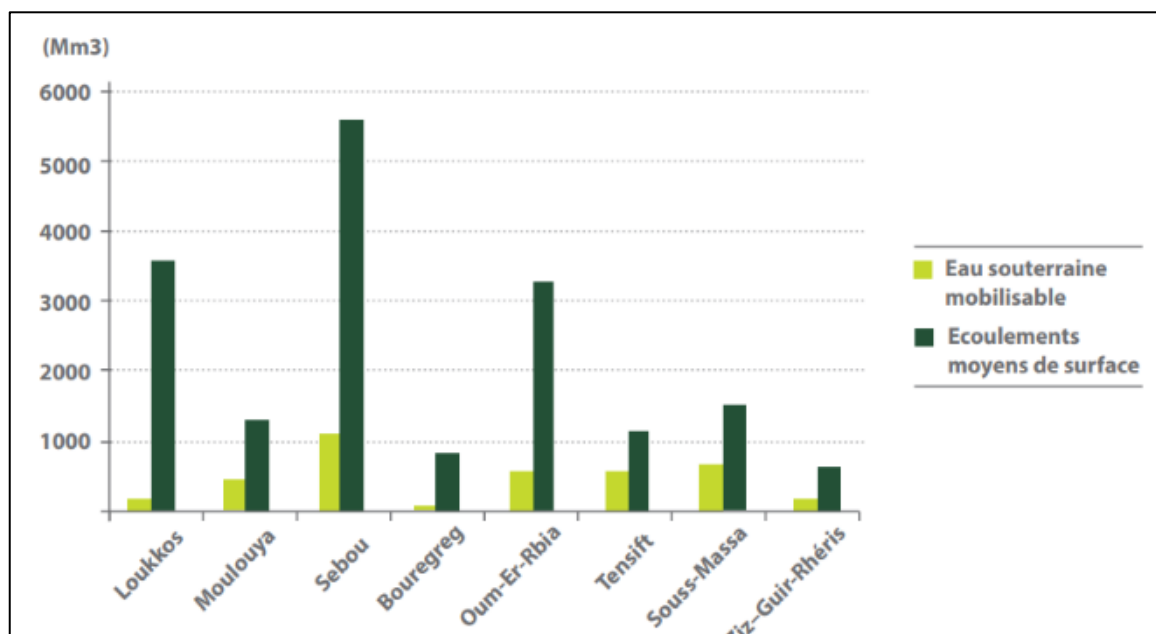


Figure 3-2: Eaux souterraines et écoulements de surface par bassin hydrographique (SEEE, 2013)

Les seuls bassins de Sebou, Oum Er Rabia et Moulouya rassemblent les deux tiers des ressources en eau de surface. L'écoulement total en eau de surface est estimé à près de 21 milliards de m³ dont la moitié environ est concentrée dans les deux bassins du Sebou et de l'Oum-Er-Rbia (Figure 3-3). En année de sécheresse sévère, les potentialités en eau de surface sont sujettes à des baisses importantes d'environ 50 à 90 %. Les régions de l'Oriental, du Tensift, du Souss- Massa et les zones sud-atlasiques sont généralement les plus touchées, mais les bassins hydrologiques du Nord sont également très sensibles aux sécheresses, d'autant que leurs ressources en eau souterraine sont souvent limitées.

1.1. L'état de l'aménagement et de l'utilisation de l'eau

L'introduction des aménagements moderne a débuté au Maroc dans les années 1920, avec la réalisation des premiers captages d'eau souterraine et des projets de barrages qui sont d'ailleurs encore en service. L'objectif de ces aménagements était principalement orienté vers la fourniture d'eau potable, d'eau pour l'irrigation et la production d'électricité.

Dans les années 1960, cette tendance à la réalisation de grands ouvrages de mobilisation des eaux de surface s'est développée. L'accroissement de la mobilisation de l'eau était devenu alors une nécessité, car seule l'introduction de l'irrigation à grande échelle permettait d'escompter un développement de la production agricole en mesure de contribuer à la satisfaction des besoins nutritionnels d'une population en croissance rapide.

Satisfaire les besoins en eau potable d'une population croissante nécessitait également de sécuriser la production d'eau potable en ayant recours à la réalisation d'ouvrages de stockage importants et parfois au transport d'eau à travers des adductions dont la longueur pouvait dépasser la centaine de kilomètres.

C'est ainsi que le Maroc dispose actuellement d'un patrimoine d'infrastructures hydrauliques compost de 85 grands barrages, d'une capacité de stockage de plus de 10 Milliards de m³ environ, permettant de fournir en année moyenne près de 6,5 Milliards de m³ d'eau superficielle régularisée.

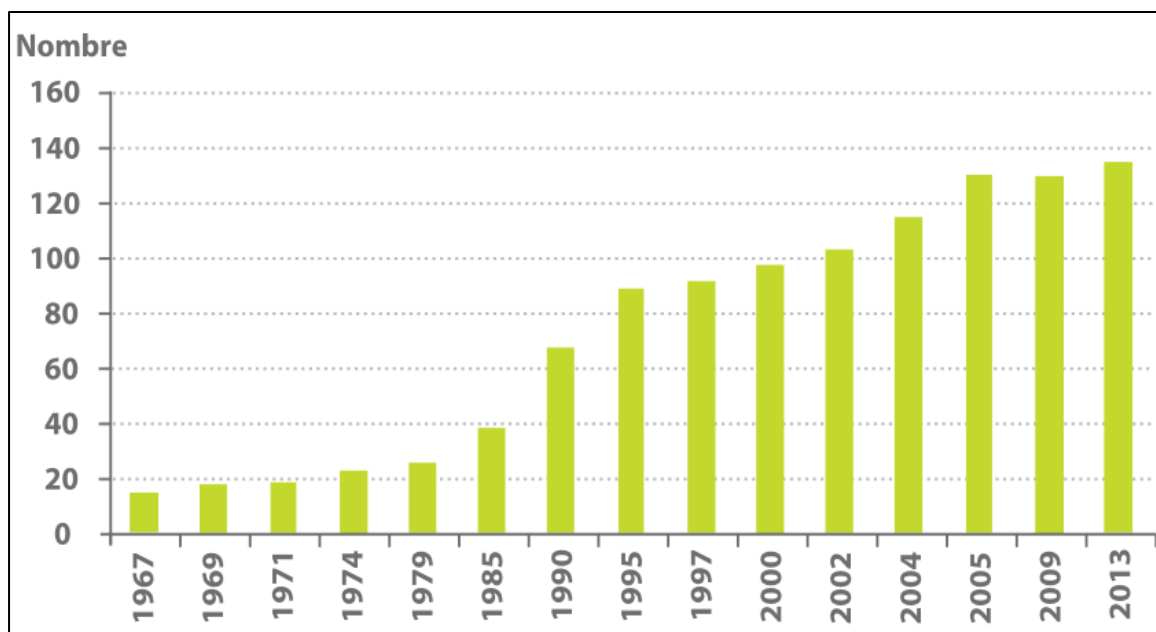


Figure 3-3: Evolution du nombre de grands barrages (SEEE, 2013)

Dans l'ensemble, les efforts déployés en matière de mobilisation des ressources en eau permettent de disposer, en année moyenne, d'un volume global de 11,5 milliards de m³ dont 3.5 d'eau souterraine (SEEE, 2013). Ce volume permet, en année moyenne, d'assurer l'irrigation de

880.000 ha, la production de 1,70 milliards de m³ pour l'alimentation en eau potable et industrielle, ainsi que la production de 2.570 Gwh en année moyenne.

La caractéristique essentielle de l'utilisation de l'eau au Maroc réside dans l'importance de la demande en eau du secteur de l'agriculture qui constitue près de 93 % de la demande globale en eau, l'eau potable et industrielle n'intervenant que pour 7 %. Dans la satisfaction de la demande en eau, la priorité est d'abord accordée à l'approvisionnement en eau potable, puis à l'irrigation, la production d'hydro électricité étant généralement soumise à la satisfaction des deux usages prioritaires (Figure 3-5).

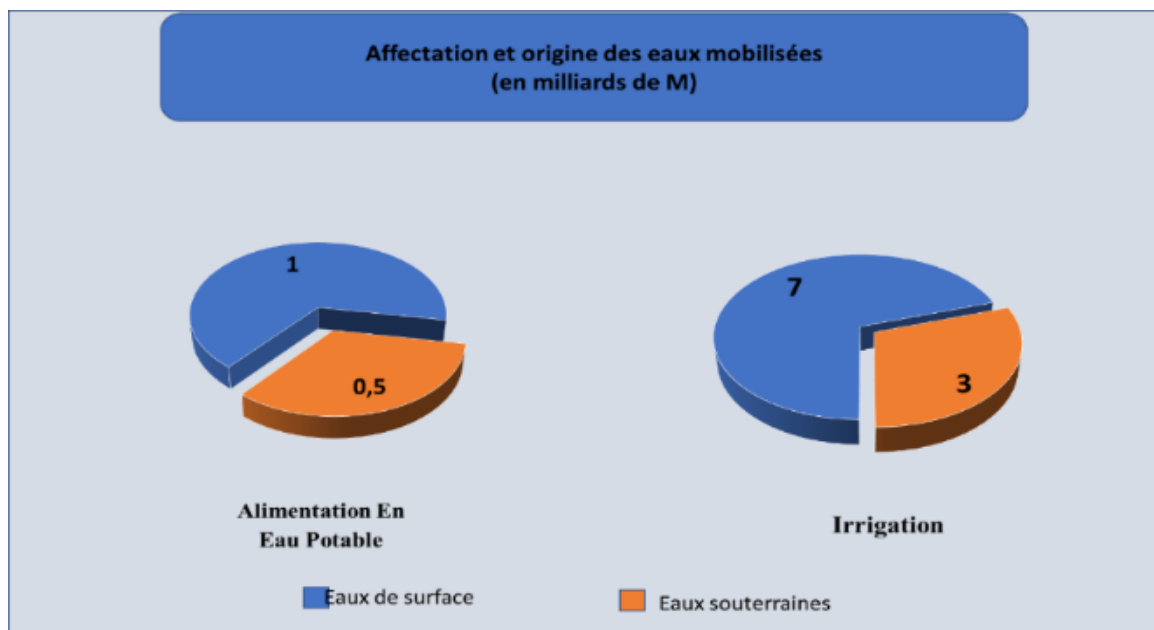


Figure 3-4: affectation et origine des eaux mobilisées (SEEE, 2013)

Dans l'ensemble, alors que la moitié du potentiel hydraulique est déjà mobilisée et que les bilans ressources besoins en eau de certains bassins hydrauliques sont encore favorables pour une à deux décennies, les situations de pénurie chronique d'eau sont déjà une réalité et la surexploitation des ressources en eau souterraine non renouvelable est déjà fortement pratiquée, particulièrement dans le Tensift et les régions sud atlantiques.

Les efforts réalisés en matière de mobilisation de l'eau ont montré le rôle essentiel joué par l'aménagement de l'eau dans l'organisation de l'espace territorial national en contribuant à l'émergence de véritables pôles de développement économique régionaux autour des grands périmètres irrigués. L'infrastructure hydraulique a aussi contribué à constituer un contrepoids à l'extension des agglomérations urbaines modernes, et à favoriser la promotion d'un développement plus équilibré entre grandes agglomérations urbaines et zones rurales.

1.2. Enjeux liés à l'eau et la nécessité d'une gestion intégrée des sécheresses au Maroc

Le développement des ressources en eau fait face aujourd'hui à des difficultés actuelles et potentielles qui font de la disponibilité de l'eau l'un des problèmes majeurs des prochaines décennies :

- La forte croissance des besoins en eau consécutive à l'important accroissement démographique attendu dans les 30 à 40 prochaines années nécessite un rythme particulièrement élevé de mobilisation de l'eau, alors que les coûts correspondants connaissent une augmentation continue ;
- L'émergence des problèmes liés à la pollution de l'eau a mis en évidence la fragilité du contexte national d'aménagement de l'eau, en particulier, l'important retard accusé dans la conservation et la protection de la qualité de l'eau ;
- L'occurrence d'épisodes de sécheresse avec une fréquence accrue lors des deux dernières décennies constitue désormais un sujet de forte préoccupation devant les risques croissants de fragilisation du contexte hydrologique de la région. Il est nécessaire que ces risques hydrologiques soient pris en compte de manière plus structurée dans les plans de développement des ressources en eau de manière à doter le pays d'un véritable plan anti-sécheresse.

Ces considérations essentielles caractérisent en fait un contexte de pression croissante et continue sur un potentiel en eau limité avec une compétition de plus en plus intense pour son utilisation. C'est l'apparition de cette compétition pour l'eau, dès les années 1970, qui a progressivement imposé le nécessaire passage d'une planification de l'eau, vers une planification intégrée prenant en compte l'ensemble des ressources et des besoins en eau, ainsi que les interrelations existantes entre le développement de l'eau, le développement économique voire social en général et la nécessité de protection du milieu naturel.

Lors des 25 dernières années, la sécheresse a frappé le Maroc de manière sévère, avec des épisodes secs généralisés de 1979 à 1984, de 1991 à 1995, de 2001 à 2008 et de 2016 à 2020. Des sécheresses similaires avaient déjà touché le Maroc en 1930, en 1937 et de 1943 à 1945.

Intégrer les préoccupations de gestion de la pénurie d'eau est également un axe stratégique des plans de développement des ressources en eau car il faut se préparer à affronter des situations dont l'acuité est de plus en plus forte au fur et à mesure que la demande globale en eau est plus grande.

Donc, l'une des grandes préoccupations actuelles au Maroc en matière de gestion de l'eau concerne les phénomènes des étiages, de leurs genèses, et la maîtrise de leurs impacts. Avec

des ressources en eau limitées et proches de la saturation, le contexte hydrologique fragile du pays est en effet de plus en plus vulnérable aux risques de défaillance découlant des périodes de sécheresse. S'ajoutent également à ces préoccupations d'autres relatives à la mise en évidence d'éventuels changements climatiques.

Comme ce travail sur les étiages est en étroite relation avec les problématiques de ressource en eau et qu'il aborde les aspects et les caractéristiques de ce phénomène ainsi que leurs impacts, nous ne pouvons pas commencer notre étude sans présenter certaines définitions afin d'éviter toute ambiguïté entre les termes « étiage », « sécheresse » et « basses eaux ».

2. L'eau dans le bassin versant de l'Oum-Er-Rbia entre le disponible et les besoins

Le bassin hydraulique de l'Oum-Er-Rbia drain environ 20 % des écoulements superficiels du Maroc (Figure 3-6). Il prend sa source au Moyen-Atlas, souvent qualifié de « château d'eau » du Maroc du fait de ses précipitations importantes et de son nombre important de sources. On va commencer par la présentation du bassin global ainsi de ces potentialités.

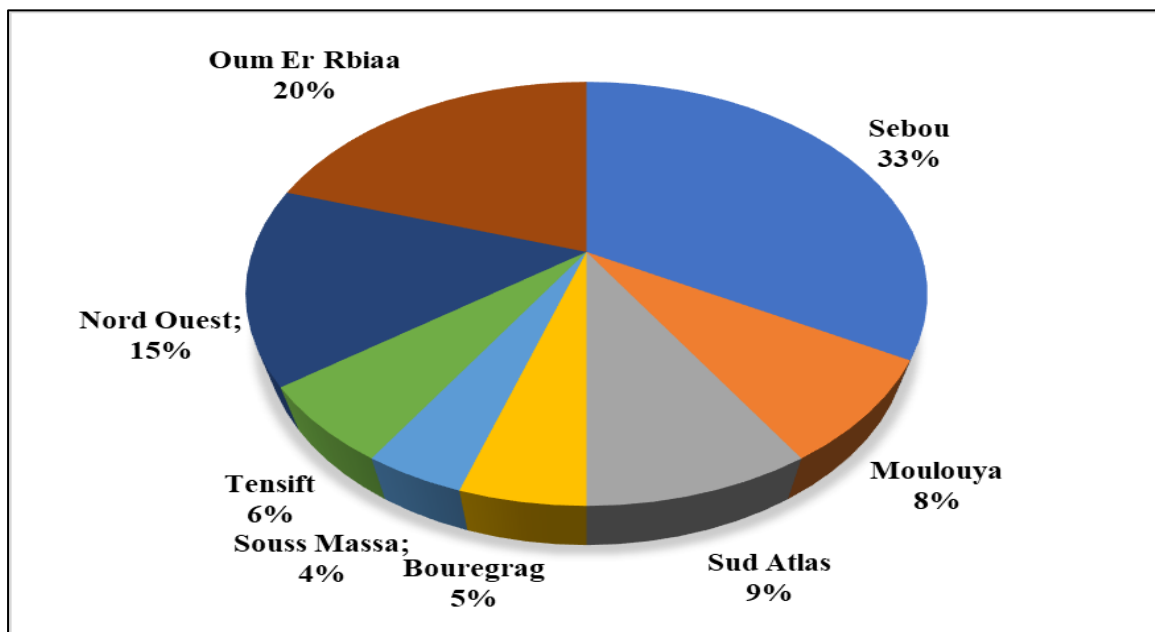


Figure 3-5: Apport des eaux superficielles par bassin versant au Maroc (SEEE, 2013).

2.1. Présentation du bassin versant de l'Oum-Er-Rbia

Le bassin de l'Oum-Er-Rbia s'étend sur une superficie de 33520 km². L'Oued Oum-Er-Rbia, d'une longueur de 550 km, prend son origine au Moyen-Atlas à 2100 m d'altitude, traverse la chaîne du Moyen-Atlas, la plaine du Tadla et la Meseta côtière et se jette dans l'océan Atlantique à environ 16 km au Nord de la ville d'El Jadida (Figure 3-7).

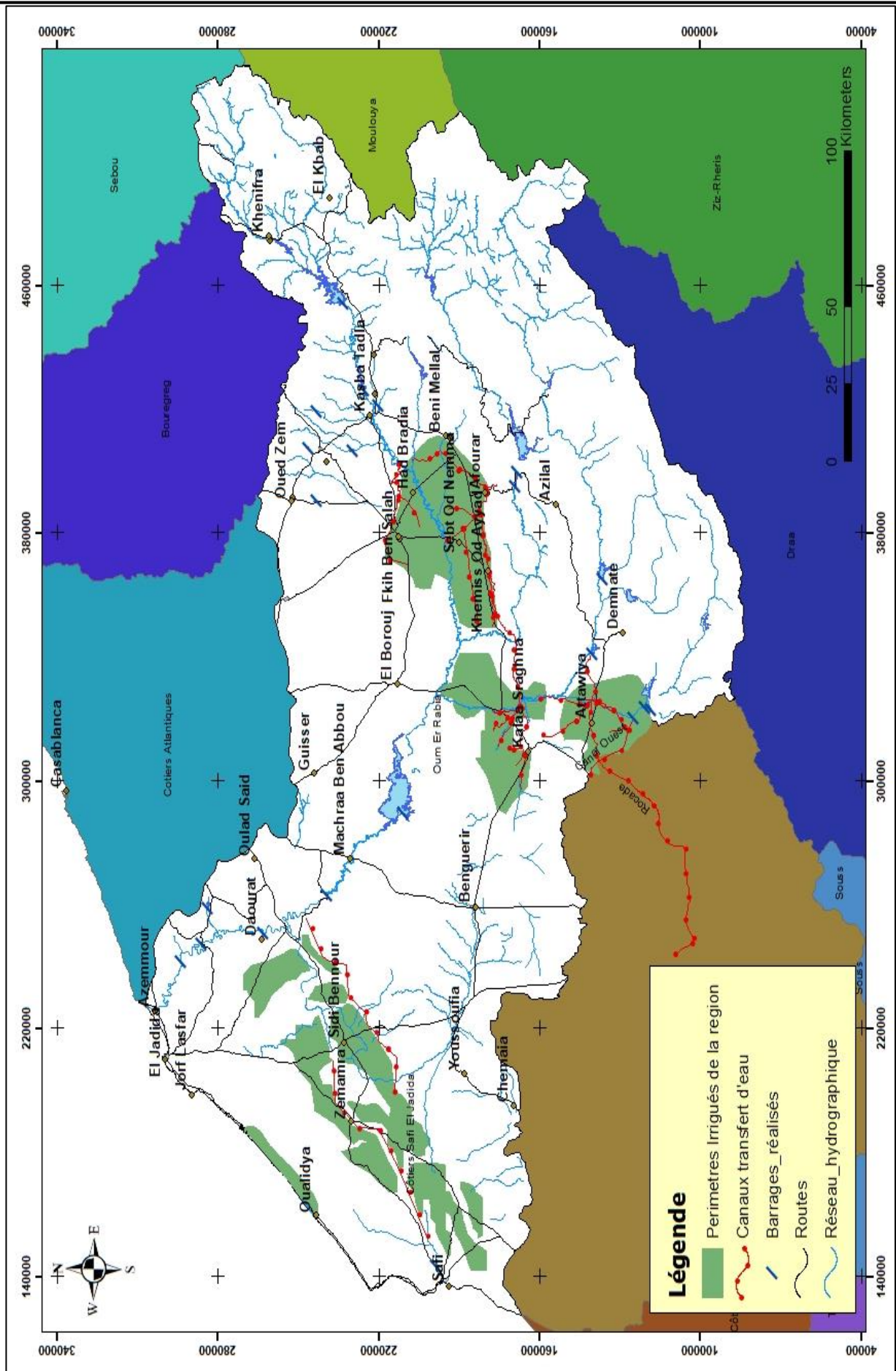


Figure 3-6: Bassin versant de l'Oum Er Rbia (ABHOER)

La population du bassin s'élève à un peu plus de 4 millions d'habitants dont 65 % en milieu rural. En effet la concentration est plus importante dans les centres et les zones limitrophes des cours d'eau et des sources.

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin de l'Oum-Er-Rbia est de 550 mm, elle varie entre 1100 mm sur le Moyen-Atlas et 300 mm dans la zone aval du fleuve. Il neige en moyenne 20 jours/an au-dessus de 800m. La température varie entre 10 et 50°C, l'évaporation : 1600 mm par an en moyenne sur la côte et 2000 mm à l'intérieur du pays avec un maximum mensuel de 300 mm en juillet et août.

La zone a une activité économique assez diversifiée incluant l'agriculture irriguée et non irriguée, les industries minières, les industries agro-alimentaires et de nombreuses grandes industries de transformation.

2.2. Eaux de surface dans le bassin versant de l'oued de l'Oum-Er-Rbia

Les cours d'eau du bassin sont constitués de l'oued Oum-Er-Rbia et de ses principaux affluents : Srou, Tessaout, Lakhdar et El Abid (Figure 3-7).

Les apports d'eau du bassin de l'Oum Er R'bia sont évalués à 3360 Mm³/an, variant entre un maximum de 8300 Mm³ et un minimum de 1300 Mm³. Les apports de nombreuses sources associés à ceux de la fonte des neiges garantissent un étiage soutenu pour l'Oum-Er-Rbia faisant de lui le cours d'eau le plus régulier du Royaume.

2.3. Eaux souterraines dans le bassin versant de l'oued de l'Oum-Er-Rbia

Les ressources en eau souterraine du bassin de l'Oum-Er-Rbia sont relativement importantes. Les structures et les caractères diversifiés des formations géologiques de la zone ont donné naissance à une succession de couches aquifères d'importance hydraulique variable et présentant des contrastes de perméabilités entre niveaux. Les principales nappes dans la zone sont résumées dans le tableau (3-3) :

Tableau 3-2: Principales nappes de la zone d'action de l'ABHOER (Source : ABHOER)

| Nappe | Superficie (Km ²) | Encaissant géologique | Epaisseur (m) | Type | Utilisation |
|---|-------------------------------|--|---------------|-------|-------------|
| Nappe profonde du Turonien de Tadla | 10000 | Calcaires dolomitiques | 30 | Libre | AEPI |
| Nappe profonde de l'Eocène de Tadla | 6400 | Calcaires à silex et marnes phosphatés | 40 | Libre | AEPI, I |
| Nappe phréatique des Beni Moussa | 885 | Complexe sédimentaire du Mio- | 40 | Libre | I |
| Nappe phréatique des Beni Amir | 600 | Complexe sédimentaire du Mio- | 40 | Libre | I |
| Nappe phréatique de la Tassaout Aval | 500 | Complexe sédimentaire du Mio- | 12 | Libre | AEPI, I |
| Nappe phréatique du Dir | 500 | Complexe sédimentaire du Mio- | 50 | Libre | I |

*AEPI : Alimentation en eau potable et industrielle, I : Irrigation.

Le bilan hydraulique des nappes de l'Oum-Er-Rbia est globalement déficitaire dénotant une surexploitation des eaux souterraines de la région.

2.4. Utilisation des eaux de l'Oued Oum-Er-Rbia

Vu son importance, le bassin de l'Oum-Er-Rbia a suscité l'attention des aménageurs depuis 1929 avec la réalisation du barrage Sidi Said Maachou. Depuis cette date, il a été réalisé 22 barrages dont 5 structurants. La capacité de stockage totale atteinte actuellement est de 5410 Mm³.

Le bassin de l'Oum-Er-Rbia se prête favorablement à une régularisation importante de ses eaux par le grand barrage Al Massira réalisé dans la partie aval du bassin. Le volume total régularisé par l'ensemble des barrages de ce bassin est de 2880 Mm³/an, ce qui représente pratiquement 30 % du volume total des eaux de surface mobilisé à l'échelle du pays. L'importance des potentialités en eau de cet oued et de ses affluents a conduit à réaliser un grand nombre d'aménagements au profit de l'eau potable, de l'agriculture et de la production de l'énergie électrique (Tableau 3-3).

Tableau 3-4: Barrage du grand bassin de l'Oum Er Rbia (Source : ABHOER)

| Barrage | | Mise en service | Capacité (Mm ³) | But | Volume régularisable (Mm ³) |
|---------------|------|-----------------|-----------------------------|----------|---|
| Ahmed HANSALI | EL | 2001 | 740,0 | EC,I | 340 |
| Ait MESSOUD | | 2003 | 14,0 | E,I,AEPI | - |
| Kasba TADLA | | 1935 | - | E,I | - |
| BIN OUIDANE | EL | 1954 | 1253,0 | E,I | 675 |
| AIT OUARDA | | 1954 | 4,0 | E,I | - |
| HASSAN 1er | | 1986 | 245,0 | E,I,AEPI | 245 |
| SIDI DRISS | | 1980 | 1,3 | I,AEPI | - |
| MY YOUSSEF | | 1969 | 161,0 | E,I | 180 |
| TIMINOUTINE | | 1979 | 5,3 | I | - |
| AL MASSIRA | | 1979 | 2760,0 | E,I,AEPI | 1130 |
| IMFOUT | | 1940 | 18,2 | E,I,AEPI | - |
| DAOURATE | | 1950 | 9,5 | E,AEPI | - |
| Sidi MAACHOU | Said | 1929 | 1,5 | E,AEPI | - |
| Digue de Safi | | 1965 | 2,0 | AEPI | - |
| Digue Daoui | Sidi | 1984 | 5,0 | - | - |
| TOTAL | | - | 5.220 | - | 2570 |

Le volume d'eau utilisé à partir des ressources en eau du bassin s'élève à environ 3520 Mm³ dont près de 90% proviennent de la mobilisation des eaux de surface. Ce volume permet actuellement l'irrigation de plus de 374000 ha (y compris les périmètres des Doukkala et du Haouz), la production de 1630 GWh d'énergie en année moyenne, la desserte en eau potable (y compris Marrakech et la zone côtière Casablanca-Safi) et la garantie d'un débit sanitaire pour la salubrité des cours d'eau (Tableau 3-4).

Tableau 3-3: Domaine d'utilisation des eaux du bassin de l'Oum Er Rbia (ABHOER)

| Usage | Besoins en eau (Mm ³) | |
|--------------|-----------------------------------|-------------|
| | 2005 | 2020 |
| AEPI | 286 | 600 |
| Irrigation | 3170 | 3400 |
| Total | 3456 | 4000 |

Axe 7 : Définition et méthodes d'identification des débits d'étiage

L'étiage est un mot typiquement français qui n'a pas d'équivalent dans les autres langues. On note que c'est la seule qui permet de distinguer entre les termes « basses eaux », « sécheresse hydrologique » et « étiage », cette distinction n'est pas opérée dans toutes les langues. L'« étiage » se traduit ainsi « niedrigwasser » en allemand, « acqua bassa » en italien, « الشح المائي » en Arab. Pour ces exemples, l'étiage est exprimé à partir d'une association de mots dont la traduction littérale les rapproche fortement de « basses eaux » en français (GLOSSAIRE INTERNATIONAL D'HYDROLOGIE (1992)). En anglais l'« étiages » est désigné par les termes « low-flow » qui se traduit en français par « les basses eaux » ou encore « hydrological drought » qui désigne « sécheresse hydrologique ». Malgré cela on trouve souvent dans la bibliographie scientifique et littéraire une confusion entre les mots « étiage », « basses eaux » et « sécheresses », il est important au départ d'établir les différences entre ces termes.

Les étiages peuvent être aussi caractérisés par une durée, un volume, etc. il apparaît ainsi comme relatif à un « seuil » qui est susceptible de varier selon le contexte géographique et se réfère avant tout à la disponibilité en eau pour satisfaire les différents usages mais aussi aux conséquences pour le milieu aquatique lui-même.

1. Définitions hydrologiques des étiages

Le mot « étiage » aurait été dérivé du mot « étier », terme qui désigne le canal qui amène l'eau de mer aux marais salants (DACHARRY, 1996). L'étiage correspondait donc à l'état d'un étier après le retrait des eaux. Une seconde étymologie, recensée dans le LITRE (1972), indique que le mot étiage pourrait renvoyer au terme latin « aestas » (été) donnant l'interprétation suivante : « le niveau de l'été pour une rivière ». Les définitions de l'étiage sont nombreuses, vagues et parfois imprécises. Plusieurs définitions sont proposées pour ce terme.

Le Glossaire International d'Hydrologie définit l'étiage comme le : « *plus bas niveau atteint par un cours d'eau ou un lac* », il s'inspire du sens donné au plus bas niveau atteint par une surface d'eau sans aucune précision temporelle. ROCHE (1986) dans le (Dictionnaire français d'hydrologie de surface) propose une autre définition qui tient en compte la notion du temps. Il définit ainsi l'étiage comme le : « *niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné* ». D'autres définitions proposent que les phénomènes d'étiages représentent des situations exceptionnelles : (« *Abaissement exceptionnel du débit d'un cours d'eau* ». Le terme de « basses eaux » ou « maigres » désigne un abaissement plus normal et plus fréquent », (DICTIONNAIRE LAROUSSE).

On trouve parfois des définitions qui assimile les étiages aux basses eaux, par exemple dans un dictionnaire de géographie la définition suivante de l'étiage : « *période de basses eaux. Synonyme de maigre* » (DICTIONNAIRE SIMPLIFIÉ DE LA GÉOGRAPHIE, SAFFACHE, 2003). Alors que d'autres définitions assimile les étiages aux sécheresses, dans ce contexte nous trouvons la définition proposée par (ABI ZEID, 1997) : « *La sécheresse des cours d'eau est une faiblesse des débits de rivières, dites à l'étiage* ».

Parfois des confusions dans la distinction entre étiage, basses eaux et sécheresse n'est pas toujours clairement établie.

1.1. Distinction entre étiage et basses eaux

Depuis longtemps les hydrologues qui se sont intéressés aux étiages ont essayé de faire la distinction entre ces deux termes « étiage » et « basses eaux ». On cite l'exemple de PARDE (1963) qui parle d'étiage avec les termes de « *maigres prononcés* », FRECAUT (1967) qui insiste également sur la différence entre ces deux termes en soulignant que « *les étiages ou maigres prononcés se différencient doublement des basses eaux ordinaires et annuelles* » et ROCHEFORT (1969) indique que les étiages représentent « *une baisse de niveau plus considérable que celle qui caractérise les basses eaux moyennes* ».

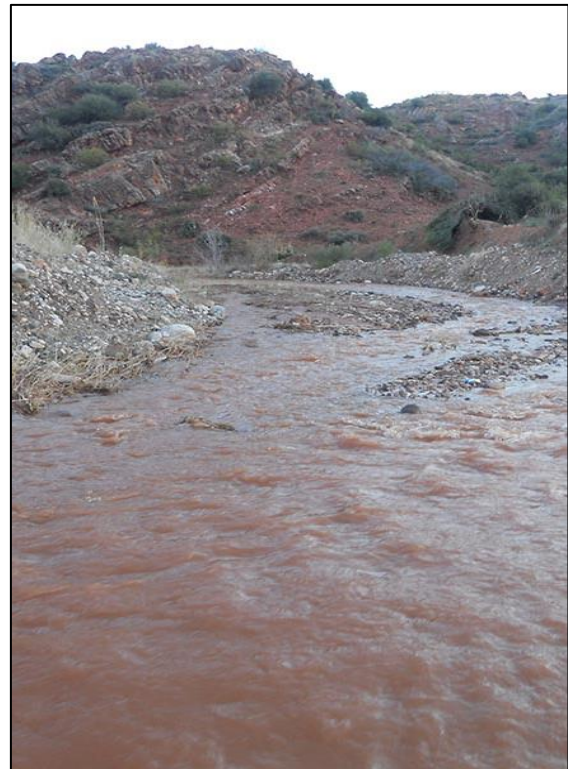


Figure 3-7 : Photos illustrant la variation saisonnière des débits entre les hautes eaux (à droite) et les basses eaux (à gauche) de l'oued Assif N'douma (Photos prises entre août 2016 et janvier 2018)

DACHARRY (1996) a essayé d'éviter cette confusion, il a proposé que les étiages correspondent aux : « *débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières, même s'il en est l'exacerbation* ».

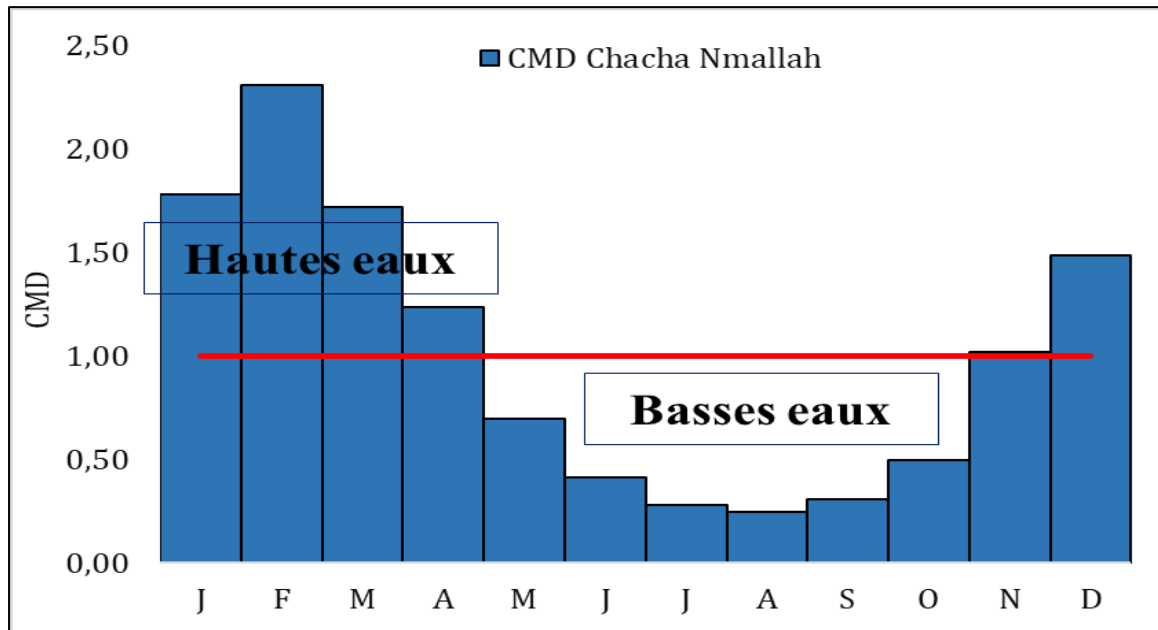


Figure 3-8: Régime hydrologique de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah (1978-2016)

Dans ce cas il s'agit d'un phénomène saisonnier faisant partie intégrante du cycle annuel de variabilité du débit, lui-même lié aux caractéristiques intrinsèques du climat régional. Les étiages peuvent être des situations annuelles ou pluriannuelles avec des débits extrêmes par rapport aux situations normales des basses eaux.

1.2. Distinction entre étiage et sécheresse hydrologique

Il est important de faire le point sur la différence entre la sécheresse, et les étiages car ces termes sont souvent confondus dans les publications, et il existe un manque d'uniformité au niveau de la terminologie.

La sécheresse est un concept très vaste qui touche plusieurs disciplines et dont le domaine de recherche inclut les sciences sociales, les sciences naturelles et le génie. Il n'existe pas de définition universellement acceptée de la sécheresse. Elle dépend du point de vue du domaine affecté (météorologie, hydrologie, géographie, développement des ressources, agriculture, industrie, production hydroélectrique, alimentation en eau, navigation, activités récréatives, etc.).

Plusieurs définitions spécifiques ont été proposées pour identifier, caractériser et classer les sécheresses (DRACUP, 1991). Ces définitions sont basées sur les conditions hydrologiques

et climatologiques, les effets sur l'humidité du sol, la production agricole (BIDWELL, 1972), et l'activité économique (MILLAN in ABI-ZEID, 1997).

LE GLOSSAIRE INTERNATIONAL D'HYDROLOGIE (1992) propose pour la sécheresse la définition suivante : « *absence prolongée ou déficit marqué des précipitations* ». Il définit la sécheresse hydrologique comme étant une « *période anormalement sec, suffisamment prolongée pour entraîner une pénurie d'eau caractérisée par un abaissement significatif de l'écoulement des cours d'eau, des niveaux des lacs et/ou des nappes souterraines, les amenant à des valeurs inférieures à la normale et/ou à un assèchement anormal du sol* ».

PERRIN (2005) définit la sécheresse comme « *un important déficit hydrique, dont l'origine se trouve essentiellement dans la faiblesse des précipitations sur une période prolongée par rapport à la moyenne des apports observés sur cette période. Ce manque de pluie a une incidence sur les différents compartiments du bassin versant (surface, sol, sous-sol...) : on parlera par exemple de sécheresse hydrologique pour un déficit d'écoulement dans les cours d'eau, de sécheresse phréatique pour un déficit dans les nappes ou encore de sécheresse édaphique pour les conséquences sur la végétation* ».

La sécheresse hydrologique étant le résultat d'un déficit pluviométrique plus ou moins long, qui provoque la réduction du stockage des lacs, du niveau des eaux superficielles ou des eaux souterraines et la diminution des débits. Ainsi, les sécheresses peuvent inclure des périodes d'étiages mais une période d'étiage ne constitue pas nécessairement une sécheresse (SMAKHTINE, 2001).



Figure 3-9: Photos illustrant la variation entre la sécheresse (à gauche) les hautes eaux (à droite) de l'oued Assif Tamharrart (entre août 206 et janvier 2018)

Les définitions précédentes n'apportent pas de précision ni sur l'origine ni sur le processus responsable du phénomène d'étiage. Dans ce contexte, la définition du Dictionnaire de la géographie (GEORGE ET VERGER, 2000) apparaît intéressante car l'étiage est désigné comme

une « période pendant laquelle les débits sont très bas et peu variables parce que issus des seules nappes souterraines en voie d'épuisement, de tarissement ». On peut souligner que les tarissements des cours d'eau constituent le processus principal durant les étiages.

La définition définitive qu'on peut donner aux étiages c'est qu'ils représentent : « La période pendant laquelle les débits sont très bas et peu variables parce que issus des seules nappes souterraines en voie d'épuisement, de tarissement ».

Donc, la définition qu'on peut retenir pour les étiages c'est que ce sont des événements naturels du cycle hydrologique, différents des sécheresses hydrologiques et des basses eaux ordinaires, qui se produit annuellement et elle représente le débit le plus bas atteint par le cours d'eau, ces débits sont issus seulement de la nappe souterraine qui est en voie de tarissement elles s'observent le plus souvent pendant les phases des basses eaux.

2. Définition statistique et indicateurs des débits d'étiage

Les étiages ne se résume pas seulement à un faible débit. Ils peuvent être caractérisés par une durée, un volume, etc. Ces aspects ne sont pas précisés dans la définition hydrologique des étiages. La définition statistique des étiages permet de décrire les étiages par de nombreuses grandeurs appelé « grandeurs d'étiages ». En effet, le régime de débit d'étiage d'une rivière peut être analysé par différentes méthodes, selon le type de données disponibles et le type de résultat recherché. Il existe de ce fait une grande variété de mesures et d'indicateurs de débit d'étiage. Le terme « *indicateur d'étiage* » est employé principalement pour définir les valeurs particulières obtenues à partir de n'importe quelle mesure d'étiage. Mais la principale difficulté réside dans le choix de la variable qui va permettre de caractériser au mieux cet événement.

Plusieurs indices ont été définis pour identifier l'étiage ainsi que les impacts que celui-ci peut avoir sur la ressource en eau. GARCIA (2016) a résumé les indicateurs du premier groupe en trois sous catégories :

- Les débits d'étiage issus des débits minimaux annuels, portent sur des débits moyens représentatifs de périodes plus ou moins longues pendant la période d'étiage. Les débits moyens sont calculés sur un intervalle de temps journalier (VCNd) ou mensuel (QMNA).
- Les débits d'étiage issus des débits minimaux annuels associés à une période de retour sont souvent associés à une période de retour T. Ces débits sont utilisés dans de nombreux pays comme seuils d'étiages.

- Les débits d'étiage issus de la courbe des débits classés qui consiste à représenter sur un même graphique l'ensemble des valeurs de débit à un exutoire, de la plus forte valeur en crue à la plus faible en étiage.

2.1. Débits d'étiage à l'échelle annuelle

Nous trouvons les débits issus de l'échelle mensuelle, en particulier le QMNA qui est le débit moyen mensuel le plus bas de l'année et les débits d'étiage calculés à partir d'un intervalle de temps journalier, les VCNd et les QCNd. L'intervalle de temps journalier peut être remplacé par une moyenne glissante sur d jours. Le nombre de jours est souvent choisi à 7 ou 10 jours pour lisser l'effet des erreurs de mesure sur les débits ou les effets liés aux activités anthropiques (LAAHA, 2000). Sur un intervalle de temps mensuel, nous parlons de débit moyen mensuel le plus bas de l'année.

- *Les QMNA :*

Il correspond au débit moyen mensuel minimal annuel, c'est largement utilisé et appliqué dans l'analyse et la caractérisation des débits d'étiages dans les pays francophones (CATALOGNE, 2006 ; LANG, 2007 ; LANG, 2011 ; GAILLIEZ, 2013 ; GARCIA, 2016). Le QMNA est aussi la variable réglementaire en France pour la caractérisation des débits d'étiages d'un cours d'eau. L'extraction des QMNA se fondent généralement sur l'observation du débit moyen mensuel le plus bas de l'année.

Le QMNA de fréquence 1/5 constitue le débit d'étiage de référence pour l'application de la police de l'eau prescrite par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992. Ce débit avait été choisi par commodité, car il s'agit d'une valeur facile à extraire des « Annuaire hydrologiques ». Puis, avec l'apparition des grandes bases de données informatisées, l'extraction d'autres valeurs s'est trouvée facilitée. ARHMA, créée en 1971 (Annuaire du Réseau Hydrométrique du ministère de l'Agriculture), ancêtre de l'actuelle banque HYDRO, constitue la première base de données sur support informatique. Elle permet le stockage des hauteurs d'eau et des courbes de tarage avec pour objectif principal la constitution des annuaires de débits moyens journaliers. Le traitement informatique des séries de données devenant un travail moins fastidieux qu'auparavant, le recours à des valeurs issues de données journalières devient plus usuel (LANG, 2007).

L'échelle calendaire imposée par le QMNA présente des inconvénients qu'il s'agit de prendre en considération dans le cadre d'un suivi et d'une gestion des débits d'étiage, notamment pour éviter une mauvaise évaluation de la situation hydrologique. Les petits cours d'eau situés en tête de bassin et évoluant dans des milieux imperméables doivent être

particulièrement bien connus car ils constituent souvent des bassins de référence, annonciateurs du risque d'étiage.

• *Les VCNd et QCNd :*

Les VCNd et les QCNd sont des valeurs extraites annuellement en fonction d'une durée fixée de d jours. Des moyennes mobiles calculées à partir des débits moyens journaliers sur d jours consécutifs aboutissent au calcul des VCNd, débit moyen minimum sur d jours, alors que les QCNd correspondent au débit maximal non dépassé sur une durée de d jours consécutifs (LANG, 2007). Ces indicateurs sont les plus communément employés pour la caractérisation de la sévérité des étiages. Il est noté MAMd dans le pays anglo-saxons et VCNd en France lorsqu'il se réfère au débit moyen minimal annuel sur d jours consécutifs. Dans la littérature, la durée d prend usuellement des valeurs égales à 1, 7, 10 ou 30 jours, néanmoins des durées plus longues peuvent être parfois utilisées pour caractériser la sévérité étiages sur le long terme (de $d = 90$ jusqu'à $d = 284$ jours) (MCMAHON ET MEINE (1986), MIDGLEY ET AL. (1994)).

La durée optimale pour le calcul des VCNd et des QCNd doit être en relation avec la définition que l'on attribue à l'étiage, mais aussi avec le caractère plus ou moins anthropisé des cours d'eau.

L'utilisation des VCNd dans l'identification des débits d'étiages serait opportun à la place des QMNA afin de limiter l'influence des précipitations (LANG, 2004). La nécessité de compléter les valeurs moyennes déterminées dans un cadre mensuel arbitraire, par des valeurs moyennes d'une série de jours consécutifs, est une idée déjà soumise par FRECAUT (1975).

Le VCN7 est connue sous le nom de débit par temps sec (HINDLEY, 1973) ou sous le nom de débit minimum annuel moyen sur 7 jours (MAM7) (PIRT ET SIMPSON, 1983 ; GUSTARD ET AL., 1992) et est utilisé au Royaume-Uni par pour les licences d'abstraction. La période de 7 jours couverte par MAM7 élimine les variations quotidiennes de la composante artificielle du débit du fleuve. De plus, une analyse basée sur une série chronologique de débit moyens sur 7 jours est moins sensible aux erreurs de mesure. Dans le même temps, dans la majorité des cas, il n'y a pas de grande différence entre les faibles débits sur 1 jour et 7 jours (SMAKHTIN ; 2001).

2.2. Les débits minimaux annuels associés à une période de retour

Les débits minimaux annuels s'avèrent le plus souvent intégrés dans une procédure d'analyse fréquentielle visant à permettre d'estimer un quantile de période de retour donné à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. Certains de ces quantiles (VCN7(T=2,10,20), VCN30(T=2,10), VCN90(T=10)) ont, par exemple, été particulièrement

étudiés aux Etats-Unis (THOMAS ET BENSON (1970), HAYES (1991), VOGEL ET KROLL (1992), DINGMAN ET LAWLOR (1995), STUCKEY (2006)). Le QMNA5 (ou débit moyen mensuel minimum annuel de période de retour 5 ans) s'inscrit bien entendu dans ce type d'approche. Il convient par conséquent de détailler ici les modalités d'ajustement employées pour déterminer ce quantile.

L'analyse fréquentielle des débits minimaux annuels montre la proportion de temps pendant laquelle un débit est dépassé (ou de manière équivalente l'intervalle moyen en années (« période de retour » ou « intervalle de récurrence ») que la rivière tombe en dessous d'un débit donné).

La courbe de fréquence est normalement construite sur la base d'une série de minima de débit annuel (débits ou volumes (QCNd) de débit minimum journalier (VCNd) ou mensuels (QMNA)), qui sont extraits de la série de débit continu d'origine disponible (une valeur de chaque année d'enregistrement). La détermination d'une loi de distribution théorique appropriée pour la caractérisation fréquentielle des variables d'étiage et le mode d'ajustement de celle-ci ont fait l'objet de très nombreux travaux dont le problème majeur dans l'étude fréquentielle des débits d'étiages réside dans l'identification d'une distribution raisonnable et de quantifier ses paramètres. De nombreuses études ont examiné quelles distributions de probabilité sont les plus appropriées pour ajuster les séquences de débits minimum annuels dans différentes régions. Parmi les fonctions de distribution les plus fréquemment mentionnées dans la littérature pour les débits d'étiages, cas des VCNd et QMNA, nous trouvons les lois : Log-normale (LN2), Weibull, Gumbel, et Pearson de type III (LP3). VOGEL ET WILSON (1996), SMAKHTIN (2001), CATALOGNE (2013). ABI-ZEID ET BOBEE (1999) ont réalisé une synthèse exhaustive des principales lois appliquées aux débits d'étiage (Tableau 3-5).

Tableau 3-5:Résumé des lois appliquées aux débits d'étiage (ABI-ZEID, 1997)

| Loi | Variable | Référence |
|---------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Weibull | Minimum annuel | GUMBEL, 1954 |
| Gumbel | Minimum annuel | MATALAS , 1963 |
| Gumbel | Minimum annuel | BERNIER, 1964 |
| Gamma, Weibull, LN 2 | Q14 | JOSEPH, 1970 |
| Weibull | Minimum annuel | CONDIE ET NIX, 1975 |
| LP3 | Minimum annuel | HOANG, 1978 |
| LP3, Weibull | Q7 | TASKER, 1987 |
| GEV | Minimum annuel | VILLASENOR ET DOURIET , |
| Weibull | Q _m = 10, 30, 60, 90, 120 | NATHAN ET MCMAHON, 1990 |
| Approche non-paramétrique | Q _{m,m} = 3 , 14 , 21 , 28 | ADAMCZYK, 1992 |

Dans la présente thèse nous nous sommes proposés, en tenant compte des particularités évoquées précédemment, de déterminer le type de loi théorique le plus approprié pour la description des distributions de QMNA et des VCNd. Pour ce faire, des tests d'ajustement sur les séries de valeurs annuelles extraites de chaque chronique de l'échantillon de référence ont été réalisés sur la loi Log-Normale, la loi de Weibull et la loi Gamma (cas particulier de la loi Pearson Type III). Les résultats obtenus après ajustement sur les séries de QMNA et VCNd ne sont pas détaillés ici. Ils permettent de constater que la loi de Log-normale s'avère nettement appropriée que les deux autres. C'est pourquoi celle-ci a été finalement retenue comme étant le meilleur compromis pour l'ensemble des stations de notre bassin versant.

2.3. Débits classés comme outils de caractérisation des débits d'étiages

Une courbe des débits classés (DC) est l'une des méthodes les plus informatives pour afficher la gamme complète des débits fluviaux, des étiages aux inondations. Il s'agit d'une relation entre une valeur de débit donnée et le pourcentage de temps pendant lequel ce débit est égalé ou dépassé, ou en d'autres termes, la relation entre l'ampleur et la fréquence des débits d'écoulement.

La méthode de construction de la courbe de DC est basée sur le rassemblement des valeurs de séries chronologiques des débits par ordre décroissant de grandeur, en attribuant des valeurs

des débits à des intervalles de classe et en comptant le nombre d'occurrences (pas de temps) dans chaque intervalle de classe. Les fréquences de classe cumulées sont ensuite calculées et exprimées en pourcentage du nombre total de pas de temps dans la période d'enregistrement. Enfin, la limite inférieure de chaque intervalle de classe de débit est tracée par rapport aux points de pourcentage. Alternativement, tous les débits classés sont tracés par rapport à leur rang qui est à nouveau exprimé en pourcentage du nombre total de pas de temps dans l'enregistrement (SMAKHTIN, 2001).

La courbe de DC peut être construite en utilisant différentes résolutions temporelles des données de débit : annuelle, mensuelle ou journalière. Les courbes de DC construites sur la base de séries chronologiques de débit journalier fournissent la manière la plus détaillée d'examiner les caractéristiques du débit d'une rivière. Les courbes peuvent également être construites en utilisant d'autres intervalles de temps, par exemple à partir de séries chronologiques de débit moyen mobile sur n jours ou n mois. Nombreux auteurs ont fourni des détails sur la construction et l'interprétation des CDC (par exemple SEARCY, 1959 ; INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980 ; MCMAHON ET MEIN, 1986).

Les débits peuvent être aussi exprimés en unités de débit divisés par unité de surface du bassin versant. Une telle normalisation facilite la comparaison entre différents bassins versants, car elle réduit les différences dans les CDC. Par conséquent, les effets d'autres facteurs sur la forme des CDC (aridité, géologie et facteurs anthropiques) peuvent être inspectés.

La forme des CDC dépend des erreurs hydrométriques et de la période d'enregistrement particulière sur laquelle il est basé. Cela a été directement ou indirectement illustré par SEARCY (1959), VOGEL ET FENNESSEY (1994), HUGHES ET SMAKHTIN (1996), MNGODO (1997) ET SMAKHTIN ET AL. (1997).

VOGEL ET FENNESSEY (1994) ont suggéré une interprétation différente d'un DC. Il considère les DC pour des années individuelles et traite ces DC annuels de la même manière qu'une séquence de maxima ou minima de débit annuel. Cette interprétation permet d'estimer les DC moyens et médians. Ces courbes représentent la probabilité de dépassement de débit au cours d'une année typique et se sont avérées moins sensibles à la durée de la période d'enregistrement, en particulier dans le domaine des faibles débits. Cette approche permet également d'attribuer des intervalles de confiance et des périodes de retour aux DC.

L'utilisation la plus intéressante pour les DC réside dans la détermination des débits des étiages. Ces débits peuvent être arbitrairement déterminés à partir de la courbe DC avec des débits inférieurs au débit médian (qui correspond au débit égal ou dépassé 50 % du temps - Q_{50}). Cette section entière de la courbe peut être interprétée comme un indice de la contribution

des eaux souterraines dans l'écoulement du bassin versant (SMAKHTIN, 2001). Si la pente de la partie des étiages du DC est faible, la contribution des eaux souterraines est normalement importante et les débits d'étiages sont durables. Une courbe raide indique une contribution de débit de base faible et variable. En ce sens, la forme de la courbe DC est une indication des conditions hydrogéologiques dans le bassin versant.

Divers indices d'étiages peuvent être estimés à partir de cette partie de la courbe du DC. Les grandeurs issues de la courbe des débits classés sont appelées débits caractéristiques (ou débits fréquentiels). On recense : le Débit Caractéristique d'Etiage (Q97), Les Débits Caractéristiques de durées 11, 9 et 6 mois : DC11(ou Q₉₀), DC9 (ou Q₇₅) et DC6 (ou Q₅₀)...

L'étiage absolu (ou minimum absolu), qui ne passe pas nécessairement par la courbe des débits classés, mais se fonde de la même manière sur tous les débits moyens journaliers disponibles car il représente le plus bas débit connu d'un cours d'eau.

Dans la littérature, les débits compris entre 70 et 99 % de dépassement de temps sont généralement les plus largement utilisés comme débit d'étiage. Les DC permettent d'aborder les étiages de manière simple sans tenir compte de leur séquence d'occurrence, et de représenter les débits les plus indigents.

Axe 8 : Définitions et méthodes d'identification des tarissements

Dans cette catégorie nous allons détailler les indices qui servent à évaluer la vitesse par laquelle le débit décroît pendant la phase de tarissement. Le coefficient de tarissement, issu de l'interprétation de la courbe de tarissement, renseigne sur la vitesse de décroissance du débit lors de cette phase et permet ainsi de différencier les différents réservoirs localisés au sein du bassin versant et qui participent par leur vidange au soutien de l'étiage.

Contrairement au climat océanique et tempéré, les débits en périodes d'étiages dans les climats semi-aride sont rarement influencés par les précipitations. Les périodes de tarissements sont longues et abondantes, comme le laissait présager l'analyse des séquences sèches. L'identification des débits de tarissement, qui représentent par définition le débit de base de la rivière, aboutit également à une méthode de séparation des écoulements.

1. Définition des tarissements.

DACHARRY (1997) définit le tarissement comme la « *phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorologique et d'intervention humaine* ». En effet, la décroissance des débits est le résultat de l'absence des précipitations et de prélèvements anthropiques continus. Durant ces périodes les rivières sont alimentées uniquement par les nappes souterraines qui sont en voie de décroissance. La définition proposée par ROCHE (1963) résume bien cet aspect, elle définit le tarissement des cours d'eau comme « *la décroissance des débits correspondant à la vidange des nappes en dehors de toute précipitation* ».

Les tarissements correspondent à la partie de l'hydrogramme d'écoulement en voie de régression en absence d'alimentation météorologique, dont leurs formes dépendent principalement de la géologie des bassins versants. La vidange des nappes durant ces phases se déroulent à des vitesses différentes dans le temps et l'espace. Les tarissements sont donc, compliqués et ne sont pas facilement quantifiables (TALLAKSEN, 1995). Ainsi, les lois qui contrôlent le tarissement des sources peuvent être appliquées aux débits des cours d'eau, puisque ces débits sont issus de ces sources en origine.

L'analyse des tarissements permet de caractériser comment les différents réservoirs présents au sein du bassin se vidangent lors de la mise à l'étiage (GRIFFITHS ET CLAUSEN (1997)) et donne une idée des propriétés de résilience du système.

- *Notion de débit de base*

Le débit de base est une composante génétique importante de l'écoulement fluvial, qui

provient du stockage des eaux souterraines ou d'autres sources retardées (stockage souterrain peu profond, lacs, fonte des glaciers, etc.). Pendant la majeure partie de la saison sèche de l'année, le débit fluvial est entièrement composé du débit de base. En saison des pluies, le débit est constitué d'un débit de base et d'un débit rapide, qui représente la réponse directe du bassin aux événements pluvieux.

Le débit de base peut être caractérisé par son hydrogramme qui est dérivé de l'hydrogramme du débit total par diverses techniques de séparation du débit de base. Des revues de ces techniques peuvent être trouvées, par exemple, dans HALL (1971). La majorité de ces méthodes se concentrent sur la séparation du débit de base d'un hydrogramme de crue (méthodes basées sur les événements) et sont souvent finalement orientées vers l'estimation de la composante de ruissellement de surface d'une crue.

2. Lois qui régissent les tarissements

Le débit de la nappe est proportionnel à sa charge (DARCY, 1856). La hauteur de la nappe est proportionnelle au débit qui sort, c'est-à-dire plus la nappe est haute, plus le débit est fort, et inversement, plus la nappe est basse, plus son débit diminue. Donc, les courbes de décroissance des débits, qui expriment la relation entre le débit et le temps en régime non influencé par les pluies, sont des exponentielles décroissantes. Durant les phases de tarissement, le débit des cours d'eau décroît régulièrement avec le temps et cette décroissance est de moins en moins rapide.

Les tarissements sont généralement décrits au moyen de modèles analytiques plus ou moins complexes dont nous trouvons une revue relativement exhaustive dans les travaux de TALLAKSEN (1995), VOGEL ET KROLL (1996) ou encore de LANG (2007). Les lois qui régissent la décroissance des débits en régime non influencé sont donc nombreuses (Figure 3-10).

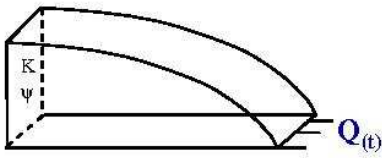
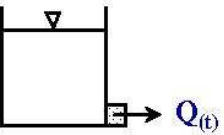
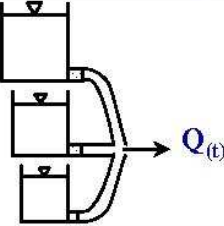
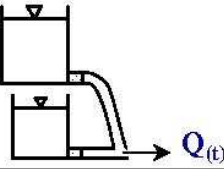
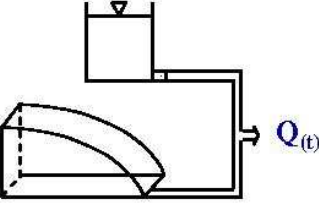
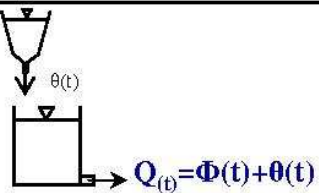

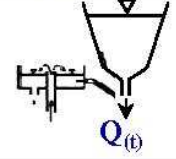
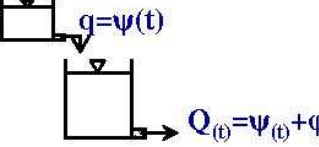
| AUTEUR | SCHEMATISATION DE L'AQUIFERE | LOI DE TARISSEMENT |
|-----------------------------------|---|--|
| Boussinesq (1903) Tison (1960) |  | $Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)}$ |
| Maillet (1905) |  | $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$ |
| Barnes (1939) Schoeller (1948) |  | $Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{oi} e^{-\alpha i t}$ |
| Horton (1933) |  | $Q_t = Q_0 e^{-\alpha t^m}$ |
| Ishihara et Takagi (1965) |  | $Q_t = Q_0 e^{-(t/c)} + Q_0 (1 + \alpha t)^{-2}$ |
| Samani et Ebrahimi (1996) |  | $Q_t = \phi t + \theta t$ $\phi t = q_0 e^{-\alpha t}$ $\theta t = (Q_0 - q_0) [1 + (n-1) \alpha t]^{n/(1-n)}$ |
| Coutagne (1948) |  | $Q_t = Q_0 [1 + (n-1) \alpha t]^{n/(1-n)}$ |
| Padilla et al. (1994) |  | $Q_t = (Q_0 - Q_c) [1 + (n-1) \alpha t]^{n/(1-n)} + Q_c$ |
| Mangin (1975) |  | $Q_t = \psi(t) + \phi(t)$ $\phi(t) = q_{ro} e^{-\alpha t}$ $\psi(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \epsilon t}$ |

Figure 3-10: Les lois qui régissent les phénomènes des tarissements (Dewandel et al., 2002 in Lang, 2007)

En manque de toute connaissance précise des configurations des aquifères des bassins étudiés, les fonctions utilisables se résument à la formulation de Maillet (modèle de décroissance exponentielle) :

| | |
|---------------------------------|--|
| $Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$ | <p>Avec</p> <ul style="list-style-type: none"> - Q_t: Le débit à l'instant t, - Q_0 : Le débit initial de la phase de récession et - $e^{-\alpha t}$: La constante de récession. |
|---------------------------------|--|

Pour ce travail, la fonction de Maillet est préférée car il s'agit de la loi communément admise pour l'analyse du tarissement des cours d'eau et constitue de loin le modèle le plus communément employé, et ce principalement en raison de sa simplicité (tant en termes de construction que d'interprétation).

L'analyse du tarissement est réalisée pour les stations du bassin de Srou sur la période 1976-2016. L'objectif étant d'analyser et de comparer les rythmes de tarissement entre les deux bassins aux contextes géologiques variés. Dans ce qui suit nous allons présenter les méthodes d'analyse du tarissement, ces derniers doivent être simples, transposables et aux résultats comparables.

3. Identification des débits de tarissement

La courbe de tarissement peut parfois être affectée par des ruptures de pentes, ou ne pas suivre la même loi de décroissance d'un bout à l'autre. En décomposant la courbe en tronçons, on obtient alors des coefficients de tarissement différents.

L'identification des périodes de tarissement consiste à détecter les débits en décroissance durant les phases non influencées par les précipitations. De nombreux auteurs ont cités des techniques d'identification des périodes de tarissement, par exemple TOEBES ET STRANG, 1964 ; GUSTARD, 1989 ; CLAUSEN, 1992 ; WMO, 2008 ; CLAUSEN, 1997, LANG, 2007). L'objet ici est de présenter les méthodes permettant la sélection des débits du tarissement. Nous citons par la suite les méthodes les plus communes et les plus répondues.

3.1. Méthode de la « courbe enveloppe »

Le principe de la présente méthode consiste à relier les points bas d'un hydrogramme s'alignant en échelle semi-logarithmique (figure). LARRAS in FRECAUT (1975) définit la «

« courbe enveloppe de tarissement » comme « l'enveloppe inférieure d'un hydrogramme », elle correspond à la courbe tangente aux points les plus bas (Figure 3-11).

L'inconvénient de cette méthode, c'est que nous trouvons au sein d'une même phase, des remontées de débits liées à des épisodes pluvieux. Ce bruit climatique risque de masquer la manifestation physique du tarissement et peut induire des choix subjectifs délicats à intégrer dans une démarche scientifique.

3.2. Méthode de la « courbe séquence »

Cette méthode tient compte de l'influence des précipitations. Le principe se base sur la sélection des débits décroissants consécutifs strictement non influencés par les précipitations (Figure 3-11).

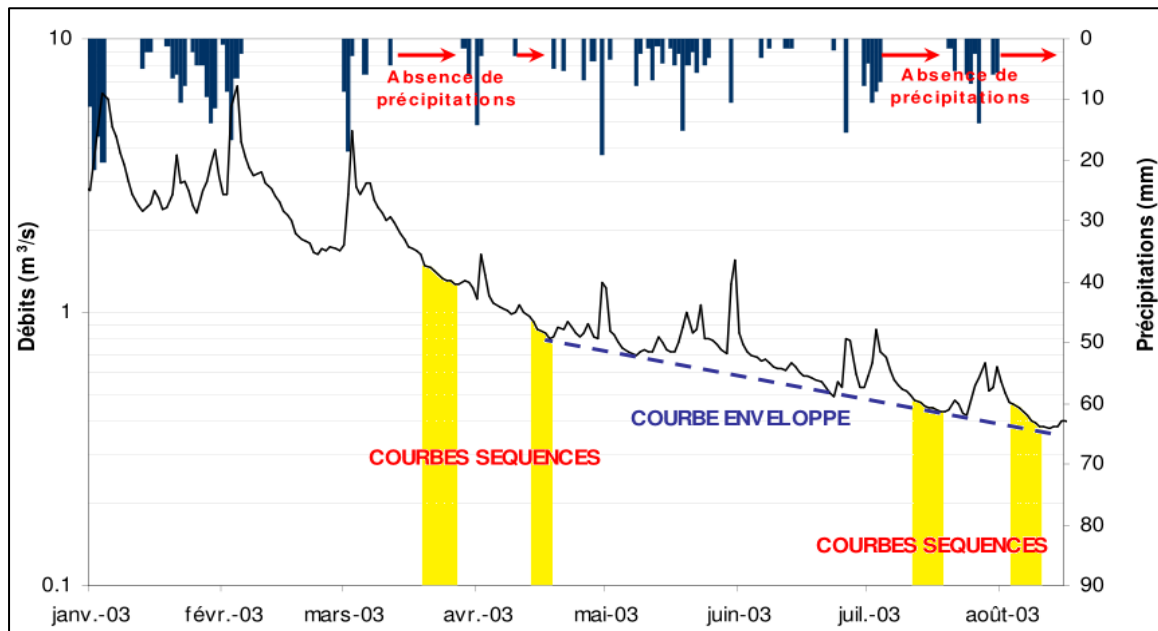


Figure 3-11: Distinction entre la courbe enveloppe et les courbes séquences - La Mortagne à Autrey- Ste-Hélène (2003) (Lang, 2007).

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle suit une procédure logique qui permet de fixer des critères de sélection rigoureux garantissant le caractère du tarissement. On note que cette procédure peut être automatisée pour la sélection des épisodes de tarissement, mais elle nécessite un second contrôle par l'opérateur.

3.3. Méthode de la « courbe de décroissance »

La procédure de cette technique consiste à la sélection des débits en décroissance, depuis le débit le plus élevé jusqu'au débit le plus bas de l'année hydrologique. La courbe proposée (Figure 3-12) débute à partir du débit le plus fort enregistré entre les mois de janvier et juin (le

mois de juin est fixé comme limite afin d'éviter de sélectionner un débit de départ en fin d'année, ce qui ferait manquer la période de tarissement) (LANG, 2007).

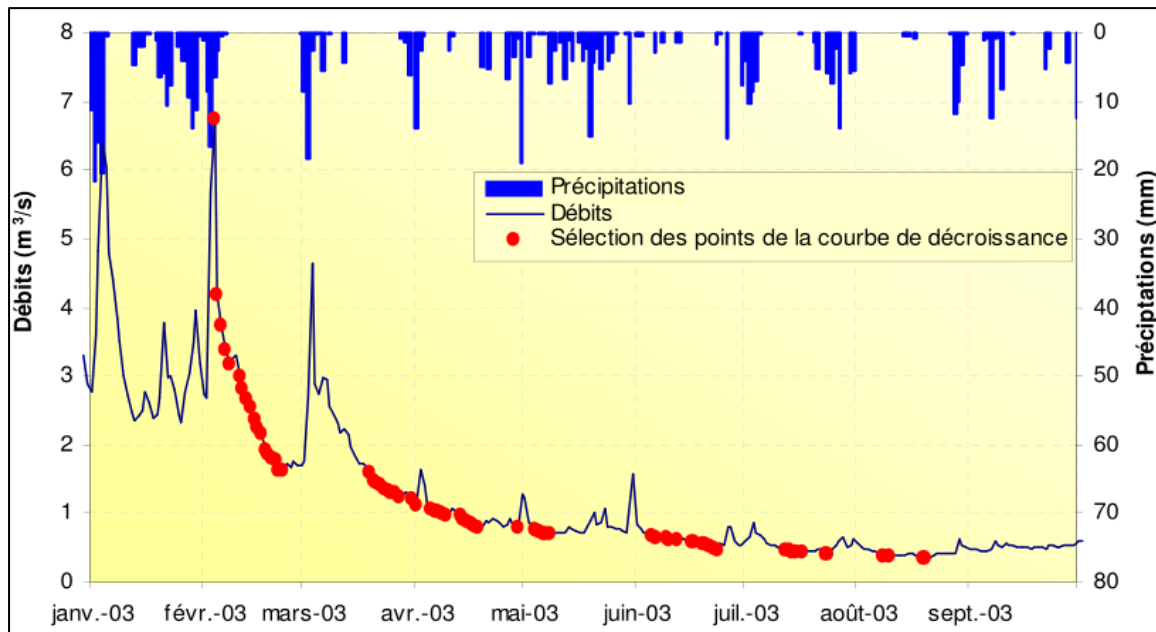


Figure 3-12: Sélection des débits de la courbe de décroissance - La Mortagne à Autrey-Ste-Hélène (2003) (Lang, 2007).

La sélection des débits est réalisée de la façon que les débits inférieurs à celui qui précède sont ensuite conservés, jusqu'au débit minimum annuel. Les débits obtenus ne sont pas consécutifs, correspondent à des épisodes indépendants. Les valeurs les plus bas retracent la courbe enveloppe et vers la fin ils peuvent constituer une courbe de décroissance continue reconstituée.

Cette méthode présente l'inconvénient qu'elle retient nécessairement des débits correspondant à de la décrue ou à du ressuyage alors que l'objet même d'une analyse du tarissement réside des débits non influencés par les écoulements de surface.

Conclusion du chapitre 3

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de la ressource en eau au Maroc en général et dans le bassin versant de l'oued de l'Oum-Er-Rbia en particulier. Nous avons trouvé que le pays va subir durant les prochaines années, un risque majeur concernant la disponibilité de l'eau. Ceci est dû à la grande explosion démographique ainsi que l'essor économique et les transformations sociologiques de la population. A cette cause s'ajoute l'irrégularité climatique et l'impact des changements climatiques qui ont aggravé la situation de la pénurie en eau.

La gestion de la ressource en eau dans le pays nécessite une étude très approfondie sur les événements et les phénomènes d'étiages.

En effet, l'étiage est un événement naturel associé au cycle hydrologique. Il entraîne une diminution du débit des cours d'eau et il a de nombreux impacts sur les écosystèmes et les activités humaines telles que l'irrigation ou l'alimentation en eau potable et la production d'électricité.

Pour une bonne gestion de la ressource en eau dans des telles conditions comme celles du Maroc, il est nécessaire d'étudier les situations d'étiages dans le but d'extraire le fonctionnement hydrologique des cours d'eau durant ces périodes. Le but est d'établir un équilibre de gestion entre le disponible et la demande.

Conclusion de la première partie

Après l'identification de la problématique de la pénurie en eau et les risques qui y sont liée, l'identification et la caractérisation des débits d'étiages apparus comme une urgente nécessité. Sur la base des définitions proposées, on a trouvé que les étiages sont des événements hydrologiques différents des sécheresses hydrologiques et des basses eaux ordinaires. Ils font partie du cycle hydrologique normale des cours d'eau. Plusieurs indicateurs servent à l'identification de ces débits.

Dans le but d'identifié les débits d'étiages, les seuils ainsi l'impact nous avons choisi le bassin versant de l'oued Srou comme lieu d'application. L'étude des paramètres morphométriques, géologiques et géomorphologiques du bassin a montré la présence de trois unités structurales hétérogènes, avec une aptitude générale au ruissellement. Ce phénomène est exprimé par des valeurs élevées de la densité de drainage. A celle-ci s'ajoute la dominance d'un substratum du Permo-Trias argileux aux larges vallées. Ce qui favorise le phénomène de l'érosion. La partie nord-est du bassin est dominée par des formations perméables du Lias. Elles favorisent l'infiltration d'une grande partie de la lame d'eau précipitée. Ces eaux rejoignent les réserves souterraines et assurent la pérennité de l'écoulement de l'oued de Srou et de ces principaux affluents. L'ensemble des paramètres morphométriques conditionnent le mode d'écoulement en période des hautes eaux et provoques des crues catastrophiques.

Les activités anthropiques n'exercent aucune influence sur les écoulements de l'oued de Srou vue la salinité de ces eaux. Mais il faut signaler la dégradation du couvert végétal du bassin par le surpâturage.

En générale, les eaux du bassin versant de l'oued de Srou sont moins anthropisées. Donc, les débits d'étiages ne seront pas influencés que par les apports pluviométriques.

Partie 2 : Le fonctionnement hydro-climatique du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Introduction de la deuxième partie

Chapitre 4 : Présentation des stations et critique des données

Chapitre 5: Apports au système hydrologique dans le bassin versant de l'oued Srou (1976-2016)

Chapitre 6 : Organisation des écoulements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Conclusion de la deuxième partie

Introduction de la deuxième partie

Le climat du bassin versant de l'oued de Srou résulte de l'aspect climatique général du Maroc. Serbout a mentionné sur une étude réalisée sur le haut bassin en 2001, dont le bassin de l'oued de Srou fait partie, que cette région bénéficie d'une double influence maritime et continentale. Il s'agit d'un climat de type méditerranéen avec des hivers pluvieux et doux et étés chauds et secs.

La description des paramètres morphologiques et lithologiques a permis de définir le contexte physique dans lequel évolue l'oued de Srou et son affluent, l'oued de Chbouka. L'étude hydro-climatique nécessite, en plus des paramètres précédents, la connaissance des facteurs climatiques, et en particulier les entrées pluviométriques. Ces derniers constituent la base des écoulements de surface et souterrains.

L'un des objectifs de cette étude est de zoomer sur les caractéristiques climatiques (pluviométrie, température et évapotranspiration) qui règnent dans le bassin versant de l'oued de Srou, sur différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle et journalière). Afin, de déterminer le fonctionnement hydrologique de l'oued de Srou et de son affluent, l'oued de Chbouka. Cette partie comprend quatre chapitres :

- Le premier concerne la présentation des stations hydro-climatiques, la critique et l'homogénéisation des données ; pluviométriques, thermométriques et hydrométriques et le comblement des lacunes. C'est une étape essentielle pour chaque étude de ce type car les données qu'on doit utiliser dans les traitements statistiques doivent être homogènes, fiables et exploitables.

- Dans le deuxième chapitre nous passerons à l'analyse des données pluviométriques annuelles, mensuelles et journalières, afin de déterminer la distribution spatiale de la pluviométrie et de définir les régions pluviométriques sur l'ensemble du bassin versant. Ensuite, on va réaliser une étude de la variabilité temporelle de ce paramètre car elle est indispensable pour la compréhension du régime hydrologique de l'oued de Srou et son affluent l'oued de Chbouka.

- Vue l'importance de la température comme facteur déterminant dans le cycle de l'eau, par l'évaporation et l'évapotranspiration, nous avons consacré le troisième chapitre à l'étude de ces deux facteurs ; température et évaporation. Cette analyse permet de réaliser un bilan hydrique, qui va permettre aussi de réaliser le bilan hydrologique du bassin versant. Dans le but

de quantifier les volumes d'eau dans les différents compartiments du cycle de l'eau au fil de l'année.

- Le quatrième chapitre traite le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'oued de Srou dans le but de comprendre leur régime. Ceci à travers une étude de la variabilité des débits à trois échelles : annuelle, mensuelle et journalière dans les deux stations hydrométriques du bassin.

Chapitre 4 : Présentation des stations hydro-climatiques et critique des données dans le bassin versant de l'oued de Srou.

Introduction du chapitre 4

Axe 9 : Présentation des stations et critique des données

Axe 10 : Contrôle de la qualité et homogénéisation des données hydro climatiques

Conclusion du chapitre 4

Introduction du chapitre 4

Comme il n'existe pas de série de données parfaitement fiables et continues, une part d'incertitude demeurera toujours dans la quantification des évolutions climatiques... Donc, il est important de vérifier la qualité des données pluviométriques, thermiques et hydrométriques.

Cette étude sera basée sur des données issues des différentes stations de mesure des paramètres de précipitation, des températures et des débits installés dans le bassin versant de l'oued de Srou et ses alentours. La période retenue s'étale sur une durée de 41 années. Au début nous nous intéressons à la critique des données utilisées, en testant leur homogénéité et en comblant les lacunes présentant dans certaines séries pluviométriques.

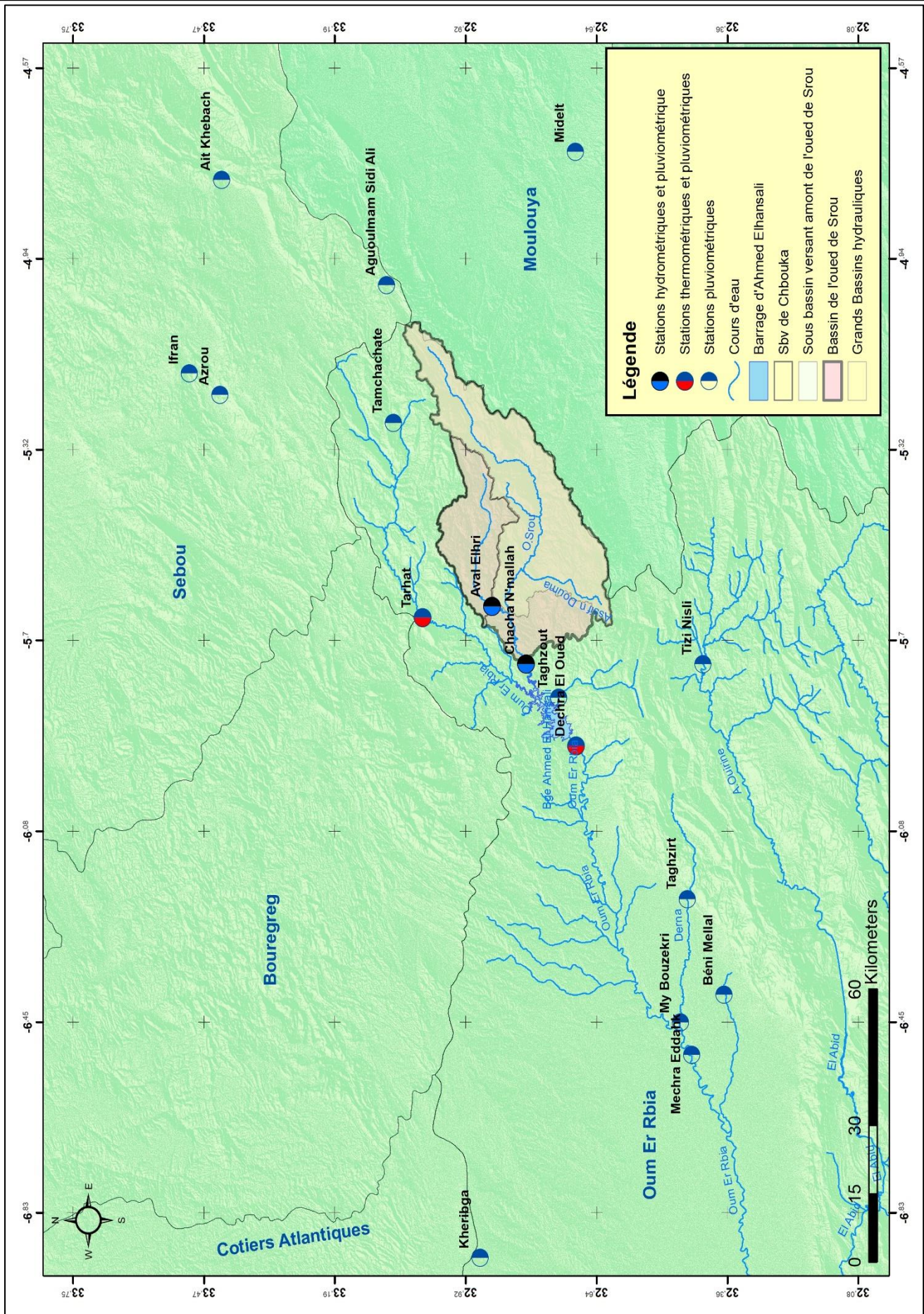
Dans le premier axe nous allons présenter les différentes stations utilisées au cours de la présente étude, les critères du choix de la chronique d'analyse. Alors que dans le deuxième axe nous allons vérifier l'homogénéité interne et externe des séries.

Axe 9 : Présentation des stations et critique des données

Le suivi de l'évolution hydro-climatique surtout dans un contexte de changement climatique est d'une importance cruciale. Elle demande des séries de données longues et homogène. « *Les études des variations hydro-climatiques à long terme doivent s'appuyer sur des séries exemptes de données manquantes et d'hétérogénéité* » (BIGOT, 2002). L'objectif de cet axe est de présenter l'ensemble des stations choisies pour l'analyse hydro-climatique du bassin versant de l'oued de Srou, les critères et le choix de la chronique d'observation.

1. Répartition géographique des stations hydro-climatiques retenues

L'ensemble des stations utilisées dans la présente étude est partagé entre différentes administrations ; l'agence du bassin hydraulique de l'Oum-Er-Rbia (ABHOER), l'agence du bassin hydraulique de la Sebou (ABHS), l'agence du bassin hydraulique de la Moulouya (ABHM), le service de la météo nationale (SMN) et les centres des travaux de l'office de la mise en valeur agricole (CT). Le rassemblement de ces données a constitué une étape très difficile et longue, en raison de nombreux déplacements et de démarches administratives auprès des services cités auparavant (Figure 4-1).



1.1. Stations pluviométriques

Deux stations pluviométriques se situent à l'intérieur du bassin versant, appartiennent au réseau de l'Agence du bassin hydraulique de l'oued Oum-Er-Rbia (ABHOER). Mais la spatialisation des précipitations demande d'autres stations qui entourent le bassin (Tableau 4-1). Le choix de ces stations est guidé par :

- La position géographique de la station par rapport au bassin versant ;
- L'absence des lacunes et la longueur de la chronique ;
- La longueur et la compatibilité des chroniques avec celles des stations du bassin versant ;

Tableau 4-1: Stations pluviométriques

| Nom de la station | Altitude (Z) | Cordonnées | | Administration |
|--|--------------|------------|--------|----------------|
| | | X | Y | |
| Les stations à l'intérieur du bassin versant de l'oued Srou | | | | |
| Aval El Heri | 830 | 478500 | 251200 | ABHOER |
| Chacha N'amellah | 685 | 467800 | 243300 | ABHOER |
| Les stations qui entourent le bassin versant de l'oued Srou | | | | |
| Tamchachate | 1685 | 512330 | 274340 | ABHOER |
| Tizi Nisli | 1346 | 467560 | 201643 | ABHOER |
| Tarhat | 1036 | 476400 | 267500 | ABHOER |
| Taghzoute | 628 | 432700 | 220200 | ABHOER |
| Dechra El Oued | 595 | 452550 | 231600 | ABHOER |
| Taghzirt | 565 | 423900 | 205600 | ABHOER |
| My Bouzekri | 452 | 401000 | 207350 | ABHOER |
| Mechra Eddahk | 406 | 394980 | 204800 | ABHOER |
| Zaida | 1470 | 541100 | 247000 | ABHM |
| Aguoulmam Sidi Ali | 2078 | 537800 | 276000 | ABHS |
| Azrou | 1250 | 517500 | 315100 | CT |
| Ifran | 1635 | 521400 | 322244 | ABHS |
| Ait Khebach | 1478 | 557000 | 314800 | ABHS |
| Midelt | 1473 | 562670 | 231755 | SMN |

1.2. Stations thermométriques

Malheureusement, le bassin versant de l'oued Srou ne dispose d'aucune station de ce type, les données utilisées dans cette étude sont issues des stations de Taghat et Dchar Eloued qui se situent à quelques kilomètres du bassin.

Tableau 4-2: Présentation des stations thermométriques

| Nom de la station | Altitude Z (m) | Cordonnées | |
|------------------------|----------------|------------|--------|
| | | X (m) | Y (m) |
| Tarhat | 1036 | 476400 | 267500 |
| Ahmed Elhansali | 595 | 452550 | 231600 |

1.3. Stations hydrométriques

Le bassin versant de l’oued de Srou possède deux stations de contrôle hydrométriques. La station d’Aval Elhri contrôle le bassin de Chbouka, affluent de l’oued Srou. La deuxième station est celle de Chacha N’mallah qui contrôle l’oued Srou après la confluence avec l’oued de Chbouka en aval de la ville d’Ait IShak. Les deux stations sont gérées par les services de l’ABHOER (Tableau 4-3).

Tableau 4-3: Présentation des stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Srou

| Nom de la station | Mise en service | Altitude Z(m) | Cordonnées | |
|-------------------|-----------------|------------------|------------|--------|
| | | | X (m) | Y (m) |
| Aval El Heri | 1972 | 830 | 478500 | 251200 |
| Chacha N'Amellah | 1972 | 685 | 467800 | 243300 |



Figure 4-2: Les stations pluviométriques et hydrométriques du bassin de Srou

2. Choix de la chronique de l’étude

L’observation des séries de données permet de constater que celles-ci sont très hétérogènes. Il y a des séries longues qui s’étalent des années 30 jusqu’à l’année 2016, elles appartiennent à la station d’Ifrane en amont du bassin versant. Des séries incomplètes, c’est le cas des stations de Dchar Eloued et Taghzout.

Devant cette situation le choix d’une chronique longue, commune et homogène est indispensable pour l’étude et l’analyse hydro-climatique. Ce choix sera guidé par la disponibilité des données pluviométriques, thermiques et hydrométriques du bassin versant.

Nous avons choisi pour la spatialisation de la pluviométrie la période 1976-2016, soit une chronique de 41 ans. Les stations retenues sont : Tamchachat, Tizi Nisli, Taghat, Aval Elhri,

Chacha N’mallah, Taghzout, Dchar Eloued, Taguzirt, Moulay Bouzekri et Dchar Eloued, Zaida, Agoulmame Sidi Ali, Azrou, Ifrane, Ait Khebbach, et Midelt.

L’analyse pluviométrique nous oblige à choisir en plus des deux stations situées à l’intérieur du bassin versant de l’oued Srou, une autre en amont. Le choix est basé sur la distance, la hauteur et la disponibilité des données. La station de Tamchachat répond à ces critères. La chronique choisie pour cette étude est de 1976 à 2016.

Vue que les séries de la température et l’évaporation dans l’ensemble des stations du haut Oum Rbia ont une chronique qui commence de l’année 1986 et se termine en 2016. Nous serons obligés de choisir une autre chronique des séries pluviométriques identique à celles des séries des températures qui sera indispensable lors de la détermination du bilan hydrique du bassin.

Pour les séries hydrologiques des deux stations du bassin versant de l’oued de Srou le choix est fixé sur la période commune disponible (1976-2016).

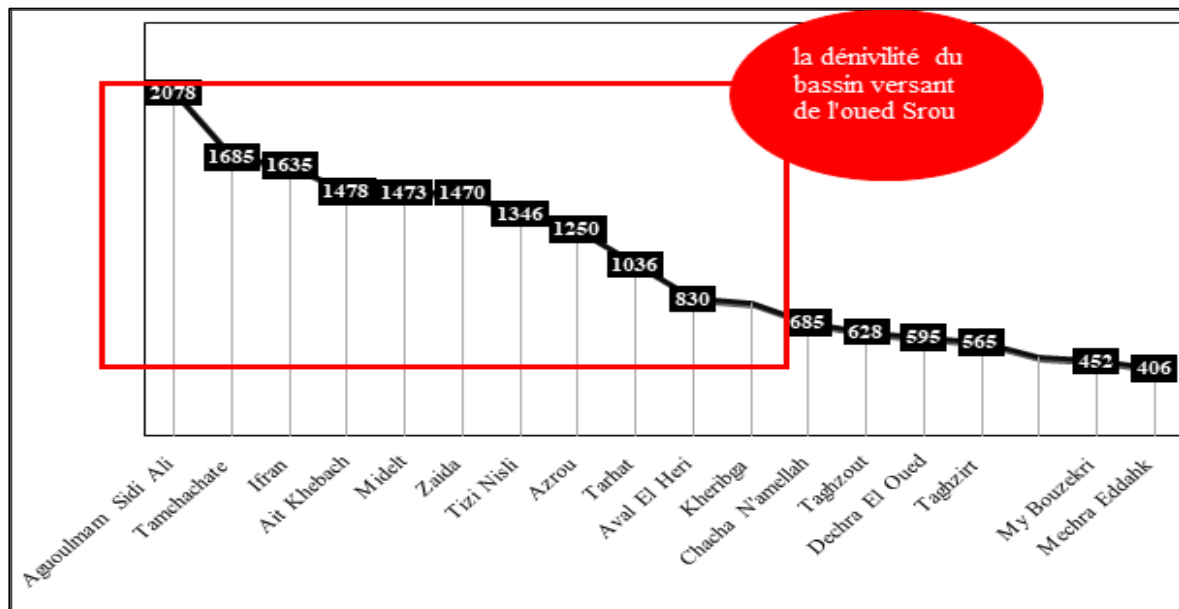


Figure 4-3 : Présentations des altitudes des différentes stations pluviométriques

Le bassin versant de l’oued de Srou possède un ensemble des stations qui permettent de mener bien l’étude hydro-climatique.

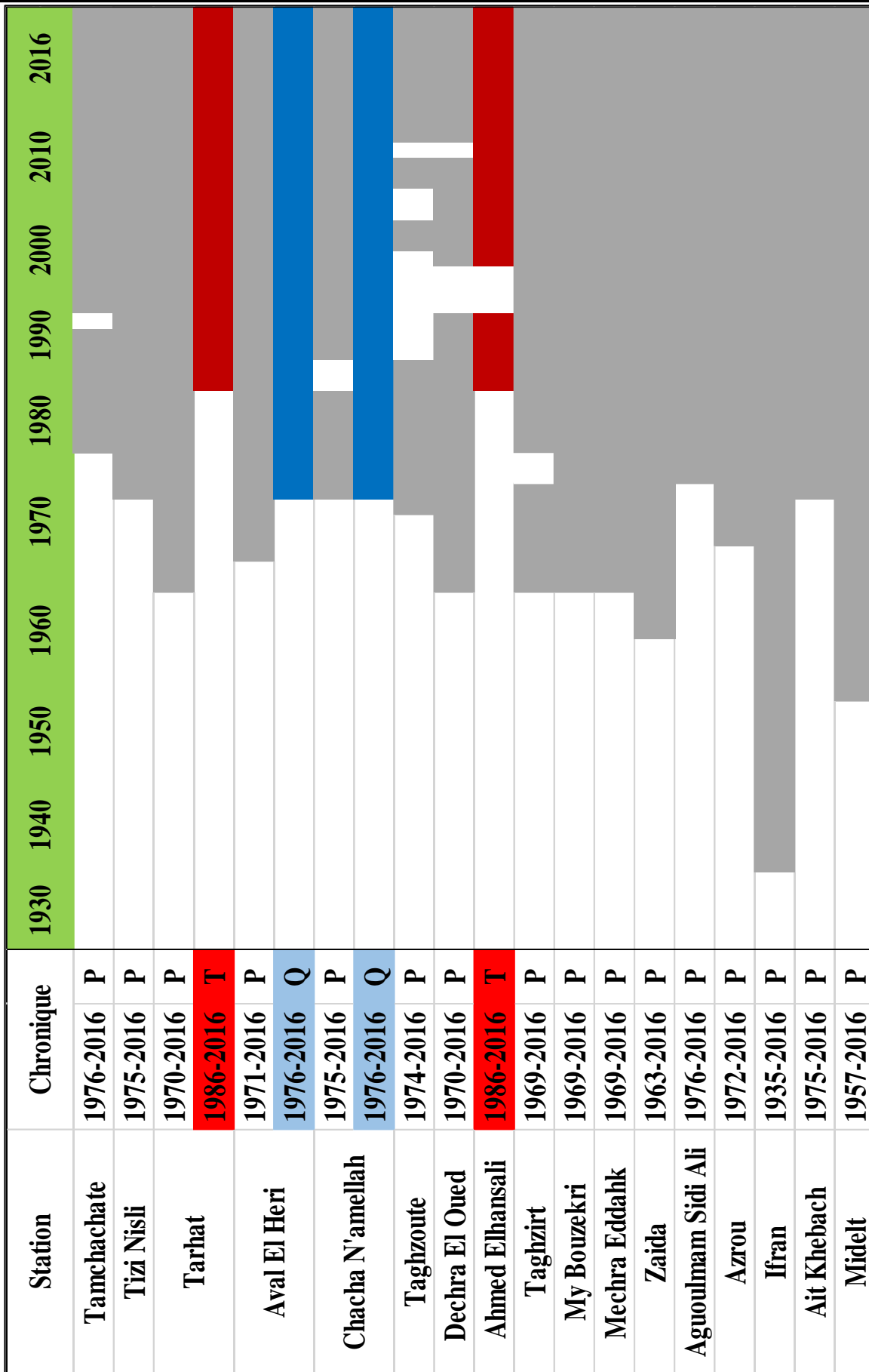


Figure 4-5: Chronogramme des stations utilisées dans l'étude hydro climatique du bassin versant de l'oued de Srou

Axe 10 : Contrôle de la qualité et homogénéisation des données hydro-climatiques dans le bassin versant de l'oued de Srou

La deuxième étape après le choix des stations est la vérification de la fiabilité des données. Plusieurs auteurs insistent sur la nécessité de la vérification de l'homogénéité de ces données avant chaque étude hydro-climatique (DUBREUIL, 1974). Le contrôle de la qualité a pour but d'identifier et d'ajuster les valeurs climatiques mensuelles et annuelles incorrectes qui peuvent nuire au calcul d'indices climatiques. Ces variations sont souvent causées par les changements d'instruments, d'observateurs, de procédures et d'emplacements de la station ; et elles peuvent nuire à l'évaluation des tendances calculées à partir d'indices climatiques.

Par ailleurs, en vue de s'assurer la fiabilité des données, les séries des données hydro climatiques vont être soumis à des tests permettant la détection des valeurs aberrantes.

1. Comblement des lacunes des pluies par la méthode de régression linéaire

La détermination des valeurs manquantes est une étape nécessaire avant de passer à la problématique de l'homogénéisation. En effet, plusieurs valeurs manquantes apparaissent dans les séries de pluies. Elles constituent un handicap majeur pour calculer les valeurs des pluies mensuelles, saisonnières et annuelles, et aussi, par la suite un handicap dans l'homogénéisation des séries de pluies.

L'analyse préliminaire des séries des données pluviométriques de différentes stations choisies dans la présente étude montre l'existence de plusieurs lacunes. Ces derniers vont de quelques mois, cas des stations de Tghazirt et la station de Machraa Dahk, à plusieurs mois consécutifs, cas des stations de Chacha N'mallah, Dechar Eloued et de Taghzout. Ces lacunes sont dues à :

- Des erreurs humaines d'enregistrement due principalement à l'absence du contrôleur dans les périodes des congés,
- Des défaillances du matériel et le retard dans sa réparation,

Tableau 4-4: lacunes observées dans les séries pluviométriques pour la chronique 1976-2016

| Nom de la station | Chronique | Données | Mois manquantes | Pourcentage des lacunes |
|------------------------|-----------|---------|-----------------|-------------------------|
| Tamchachate | 1976-2016 | J+M+A | 11 | 2,5 |
| Chacha N'mallah | 1976-2016 | J+M+A | 21 | 4,6 |
| Taghzoute | 1976-2016 | J+M+A | 91 | 20,0 |
| Dechra el oued | 1976-2016 | J+M+A | 19 | 3,7 |

Les lacunes dans la station du Dchar Eloued correspond à la période de la construction du barrage d’Ahmed Elhansali. Pour la température, les séries de la station d’Ahmed Elhansali présentent une lacune de deux ans. Seules les données des stations hydrométriques sont complètes.

Diverses techniques appropriées peuvent être utilisées : la plupart sont fondées sur l’hypothèse d’une corrélation spatiale. Afin de reconstituer les données manquantes, nous avons utilisé la méthode de la régression linéaire proposée par DUBREUIL (1974).

Principe de la méthode

Cette méthode consiste à estimer les valeurs manquantes d’une série pluviométrique lacunaire à partir des observations d’une autre station de séries continues et homogènes.

Pour que cette méthode soit efficace, il faut que la régression soit linéaire et que les variables confrontées suivent une loi normale. On estime la variable « y » à partir de la variable « x » par la droite :

| | |
|---------------------------------|---|
| $y = a x + b$ | Avec - y : valeur estimée - a : pente de la droite - b : constante |
|---------------------------------|---|

La qualité de l’équation est basée sur le calcul du coefficient de corrélation R. Tant que R, entre deux stations, est supérieur à 70 %, la corrélation considérée comme satisfaisante. Lorsqu’il dépasse 80 %, la corrélation est bonne. L’application de la méthode de corrélation demande :

- Une équation linéaire entre les données des deux stations.
- Coefficient de corrélation fort.
- Les variables suivent la loi de Gauss

La corrélation est réalisée mois par mois (DUBREUIL, 1974). Mais pour les mois secs qui présentent des valeurs faibles de R, on a choisi le plus élevé. Les valeurs de R montrent que la corrélation des données pluviométriques est généralement bonne, elle dépasse 74 % sur l’ensemble des corrélations effectuées (Tableau 4-6).

La corrélation des mois d’été qui présentent des précipitations orageuses donne des résultats insuffisants. Ce qui est traduit par un coefficient R faible. Ceci nous a amené à adopter l’autocorrélation. Cette dernière s’appuie sur la moyenne du même mois de la série statistique. Cette méthode est utilisée aussi pour combler les lacunes observées dans les séries thermométriques de la station d’Ahmed Elhansali.

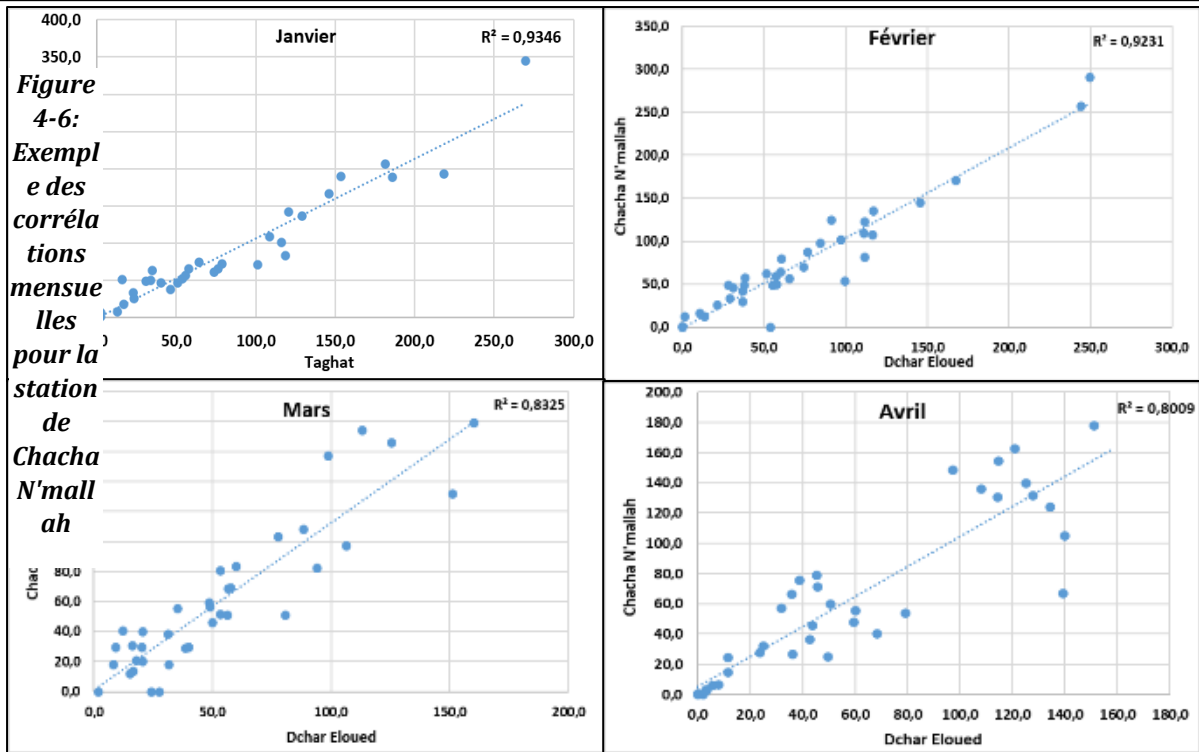


Tableau 4-5: Corrélation pluviométrique mensuelle des mois manquants (1976-2016)

| Stations | Mois manquantes | R ² | Stations corrélées |
|------------------------|-----------------|----------------|--------------------|
| Tamchachat | Juin | 0,83 | Aval Elhri |
| | Juillet | 0,39 | Ait Khebbach |
| | Aout | 0,53 | Azrou |
| Chacha N'mallah | Janvier | 0,93 | Taghat |
| | Février | 0,92 | Dchar Eloued |
| | Mars | 0,83 | Dchar Eloued |
| | Avril | 0,80 | Dchar Eloued |
| | Mai | 0,84 | Taghzout |
| | Juin | 0,79 | Machraa Dahk |
| | Juillet | 0,84 | Dchar Eloued |
| | Septembre | 0,88 | My Bouzkri |
| | Octobre | 0,94 | Aval Elhri |
| | Novembre | 0,96 | Dchar Eloued |
| Décembre | 0,96 | Taghzirt | |

La corrélation linéaire a permis de remplir l’ensemble des lacunes observées dans les séries de données pluviométriques. Alors que pour les cas des mois d’été et les lacunes de la température, elles sont corrigées par la méthode de corrélation des moyennes.

2. Vérification de l'homogénéisation externe des stations hydro-climatiques

Les résultats de corrélations obtenus auparavant doivent être validés par une deuxième corrélation. Cette dernière se fait entre les stations. L'objectif est de vérifier l'homogénéité de ces données les unes par rapport à celles des autres stations.

2.1. Application de la méthode des doubles Cumuls

Cette méthode a été exposée par BRUNET-MORET EN 1971, puis elle est reprise par DUBREUIL (1974). Il s'agit de comparer les sommes cumulées des séries pluviométriques d'une station à celles d'une autre station de référence, ayant une chronique assez longue, continue et appartient au même contexte climatique et géographique.

La station d'Ifrane remplit cette fonction, elle présente la plus longue chronique (1935-2016), avec une absence totale des lacunes et appartient au même contexte hydro-climatique du bassin versant de l'oued Srou.

La fiabilité des données pluviométriques de la station est vérifiée à l'aide du coefficient de corrélation R. Plus la valeur du R est proche du 1 plus les données des deux stations sont homogènes.

SERBOUT (2001) a proposé la classification des relations entre les stations sur la base du R^2 en 3 catégories (Tableau 4-7) :

- $R < 0,75$; corrélation faible
- $0,75 < R < 0,90$; corrélation bonne
- $R > 0,90$ corrélation très bonne.

Sur l'ensemble des corrélations, 33,8 % des stations présentent un $R^2 < 0,75$. Ce sont les stations des fortes altitudes ; Tamchachat, Agulmam Sidi Ali, Ait Khebbach et la station de l'autre façade du Moyen-Atlas ; la station de Zaida.

Tableau 4-6: Pourcentage des corrélations pour l'ensemble des stations pluviométrique (1976-2016)

| Coefficient de corrélation | Période 1976-2016 | Qualité |
|----------------------------|-------------------|------------|
| R<0,75 | 33,8 % | Faible |
| 0,75<R<0,90 | 56,6 % | Bonne |
| 0,90<R | 9.5 % | Très bonne |

Si ces stations ne présentent pas une bonne corrélation malgré la proximité géographique, c'est parce qu'elles n'ont pas les mêmes affinités climatiques. Généralement le pourcentage de corrélation supérieur à 0,75 est de 66 %. C'est-à-dire que les stations pluviométriques se

corrèlent bien malgré l'hétérogénéité des sites et des positions géographiques. Ces résultats permettent de mettre en évidence la grande affinité pluviométrique entre les stations de la zone d'étude (Figure 4-8).

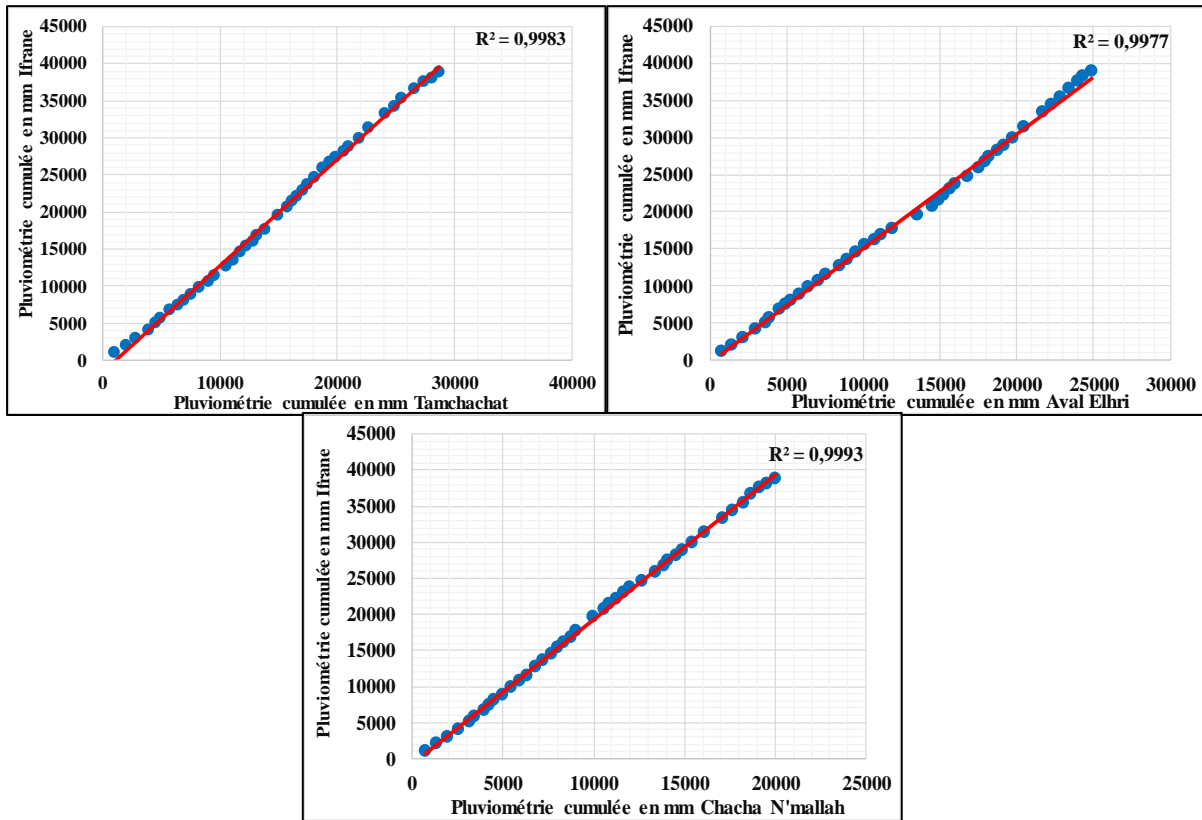


Figure 4-7: Pluviométrie cumulée aux stations de Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah par rapport à la station de références d'Ifrane (1976-2016)

Tableau 4-7: Matrice de corrélation des stations pluviométriques (1976-2016)

| Stations | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 1 Tamchachate | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 Mechra Eddahk | 0,8 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 Zaida | 0,4 | 0,4 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| 4 Aguoulmam Sidi Ali | 0,7 | 0,6 | 0,5 | 1 | | | | | | | | | | | |
| 5 Azrou | 0,8 | 0,8 | 0,4 | 0,7 | 1 | | | | | | | | | | |
| 6 Ifran | 0,9 | 0,8 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 1 | | | | | | | | | |
| 7 Ait Khebach | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,7 | 0,5 | 0,5 | 1 | | | | | | | | |
| 8 Tizi Nisli | 0,8 | 0,8 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 1 | | | | | | | |
| 9 Tarhat | 0,9 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 1 | | | | | | |
| 10 Aval El Heri | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,9 | 1 | | | | | |
| 11 Chacha N'amellah | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 | | | | |
| 12 Taghzoute | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,9 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 | | | |
| 13 Dechra El Oued | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 | | |
| 14 Taghzirt | 0,8 | 0,9 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 | |
| 15 My Bouzekri | 0,7 | 0,9 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 1 |

L’application de la méthode des doubles cumuls aux données thermiques des stations d’Ahmed Elhansali et Taghat, et à celles des données hydrométriques des stations d’Aval Elhri et Chacha N’mallah ne révèle ni anomalie ni aucune hétérogénéité (Figure 4-9).

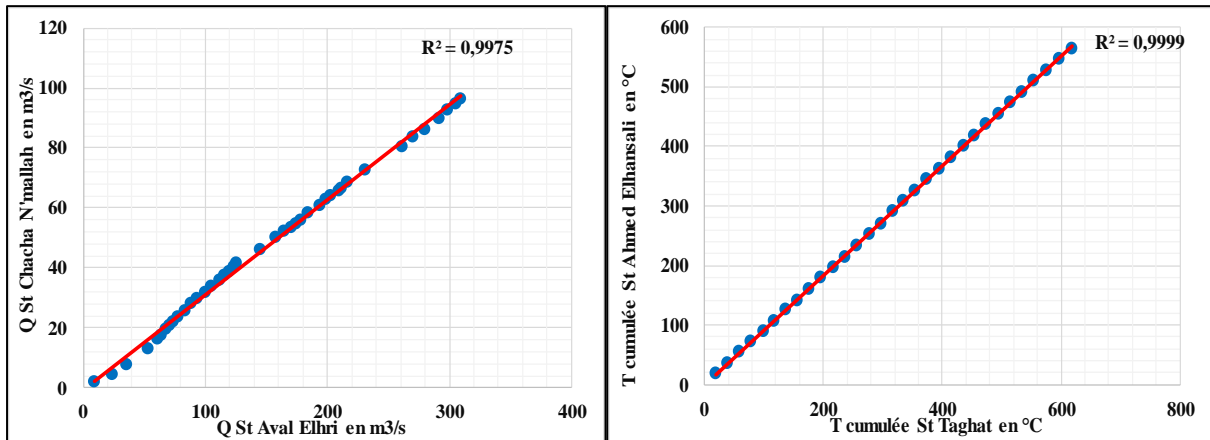


Figure 4-8: Méthode des doubles cumuls appliquée aux données thermométriques (St Ahmed Elhansali et Taghat 1986-2016)

Les valeurs des coefficients de corrélations indiquent que les liaisons entre les stations sont cohérentes.

2.2. Application de la méthode de la vecteur régional (MVR) sur les données pluviométriques (1976-2016)

Le vecteur régional est une méthode de critique des données. Elle permet de déterminer la qualité, de comparer géographiquement et de corréler les données d’une station avec d’autres stations (liaison inter-postes). Cette méthode a été élaborée par (HIEZ, 1977), elle représente la tendance pluviométrique la plus probable de la région considérée sous une forme compacte. Elle utilise un modèle de type : $A=B+E$ où A est la matrice des observations de dimension n (nombre d’année) fois m (nombre de stations), B est la matrice des données théoriques et E la matrice des erreurs (appelées également anomalies ou résidu).

Nous avons utilisé le logiciel Hydraccess (VAUCHEL, 2000 ET 2004) de l’IRD. L’Hydraccess produit une suite chronologique d’indices annuels représentant la pluviosité et une moyenne interannuelle étendue pour chaque station analysée. C’est à partir de ces deux valeurs (indice de pluviosité et moyenne interannuelle) que le logiciel peut reconstituer les valeurs de la pluviométrie annuelle manquante pour les séries des stations présentant des lacunes. L’annexe I présente les valeurs pluviométriques qui ont été comblées.

Prenant le seuil de 70% choisie par QADEM (2015) dans l’étude qu’il a faite sur le haut Sbou, qui présente les mêmes caractéristiques géographiques et climatiques de notre zone d’étude.

Toutes les stations choisies dépassent le seuil fixé, à l'exception de la station de Zaida qui présente un faible seuil (Tableau 4-9).

La station d'Ifrane présente une valeur semblable à celle de la station de Tamchachat. Ceci est dû à la proximité géographique et la même altitude des deux stations.

Les stations d'Aval Elhri, Chacha N'mallah, Taghazout, Dchar Eloued et Taghzirt ont aussi des valeurs autour de 80%. Ces stations ont des caractéristiques climatiques semblables dues à leur position géographique dans le Dir du Moyen-Atlas. Sur la base de ces résultats on peut dire que l'ensemble des stations ont la même affinité climatique (Figure 4-10).

Tableau 4-8: Coefficient de corrélation obtenu par la MVR (1976-2016)

| Station | Altitude | Bassin versant | Corrélation vecteur |
|---------------------------|----------|----------------|---------------------|
| Tamchachate | 1685 | Oum-Er-Rbia | 0,817 |
| Tizi Nisli | 1346 | Oum-Er-Rbia | 0,902 |
| Tarhat | 1036 | Oum-Er-Rbia | 0,960 |
| Aval El Heri | 830 | Oum-Er-Rbia | 0,938 |
| Chacha N'Amellah | 685 | Oum-Er-Rbia | 0,930 |
| Taghzoute | 595 | Oum-Er-Rbia | 0,929 |
| Dechra El Oued | 628 | Oum-Er-Rbia | 0,872 |
| Taghzirt | 565 | Oum-Er-Rbia | 0,906 |
| MY Bouzekri | 452 | Oum-Er-Rbia | 0,862 |
| Mechra Eddahk | 406 | Oum-Er-Rbia | 0,875 |
| Zaida | 1470 | Mellouya | 0,599 |
| Aguoulmam Sidi Ali | 2078 | Sebou | 0,775 |
| Azrou | 1250 | Sebou | 0,874 |
| Ifran | 1635 | Sebou | 0,912 |
| Ait Khebach | 1478 | Sebou | 0,772 |

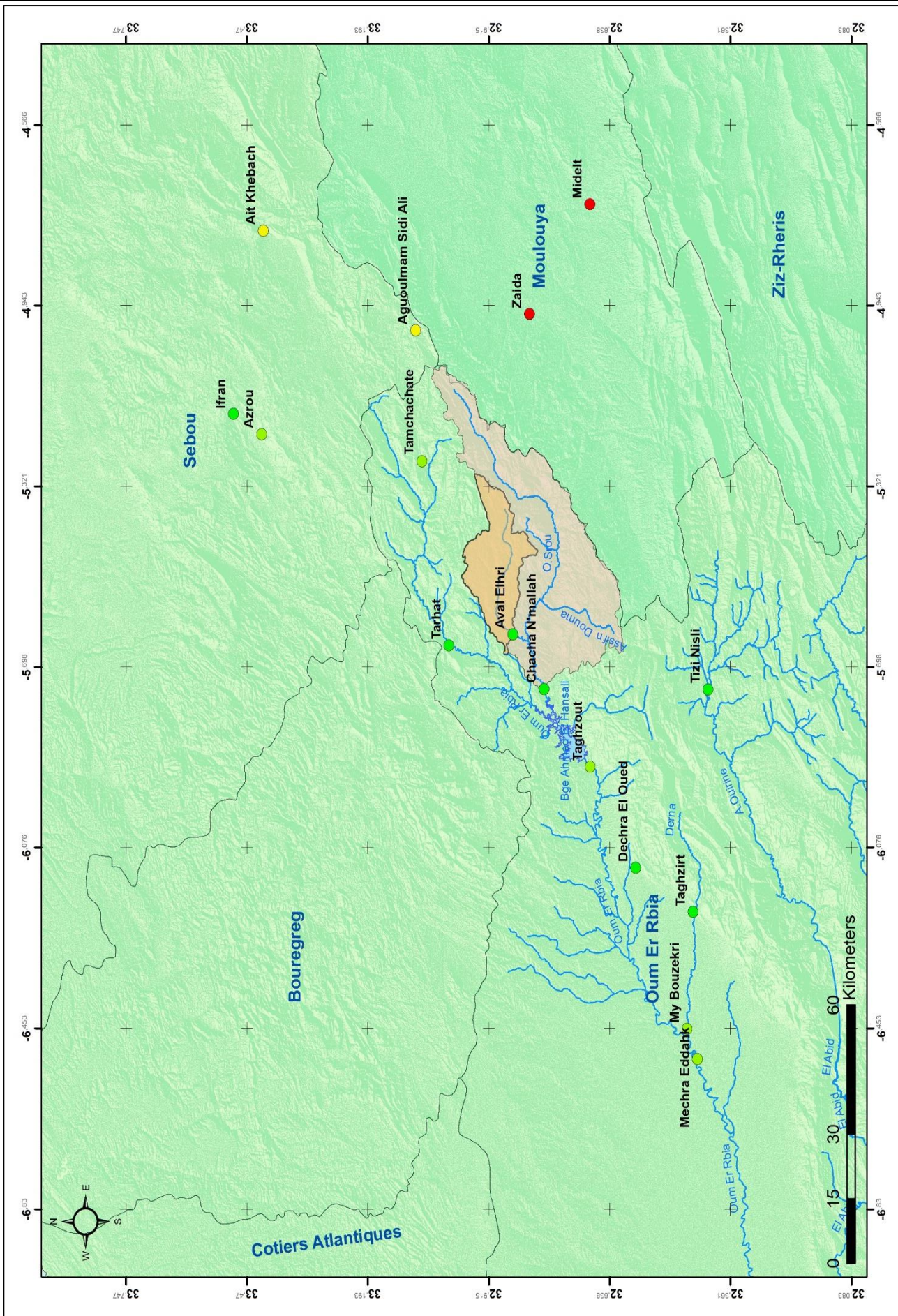


Figure 4-9: Résultats de la méthode vecteur régional (1976-2016) (MNT 2016)

3. Vérification de l'homogénéisation interne des stations pluviométriques retenues par la méthode « Cusum »

La méthode Cusum (Cumul Sum) est proposée par Lettenmeyer en 1976, puis elle est développée et adaptée aux données hydro-climatiques en France par François Gille et Zumstein en 1993 (SERBOUT, 2001). Le premier objectif de la méthode Cusum est de déterminer l'hétérogénéité interne de la série étudiée (EL GHACHI, 2007).

Le principe de la méthode est fondé sur le simple cumul qui met en relation les cumuls des pluviométries, des hydrométries et des thermométries moyennes annuelles d'une station donnée en fonction des périodes qui leur correspondent (SERBOUT, 2001). La méthode Cusum représente l'écart des cumuls des valeurs (Cj) avec la droite moyenne. Le calcul du Cusum se fait à partir de la relation suivante :

| | |
|--------------------------------------|--|
| $C_j = \sum_{j=1}^N (X_j - \bar{X})$ | Avec |
| | Xj : pluie annuelle |
| | \bar{X} : moyenne pluviométrique de la période étudiée |
| | N : nombre d'années jusqu'à l'année i |

La détermination de l'homogénéité interne de la série se base sur la définition d'un intervalle de confiance (bande passante Cjx) (FRANÇOIS ET AL, 1993). Le calcul de cet intervalle se fait par la relation suivante :

| | |
|---|--------------------------------------|
| $C_{jx} = \pm S \left(\frac{u\sqrt{N}}{4} + \frac{u^2}{2\sqrt{2}} + \frac{u^3}{8\sqrt{N}} \right)$ | Avec |
| | S : écart type |
| | u : variable réduite de Gauss (1.96) |
| | N : nombre de valeurs de la série |

En effet, si le plus grand Cusum(t) calculé dépasse le Cjx défini, la série considérée n'est pas homogène. Dès lors, au moins deux sous séries peuvent être individualisées. Elles traduisent soit un saut de moyenne, soit une tendance linéaire. Différents tests pourront déterminer la tendance suivie par ces sous séries. Chaque fois qu'une hétérogénéité apparaît, il faut qu'il existe une tendance entre le temps et les valeurs de la série. La méthode des Cusum sera alors répétée jusqu'à l'obtention des séries homogènes (FRANÇOIS ET AL., 1993).

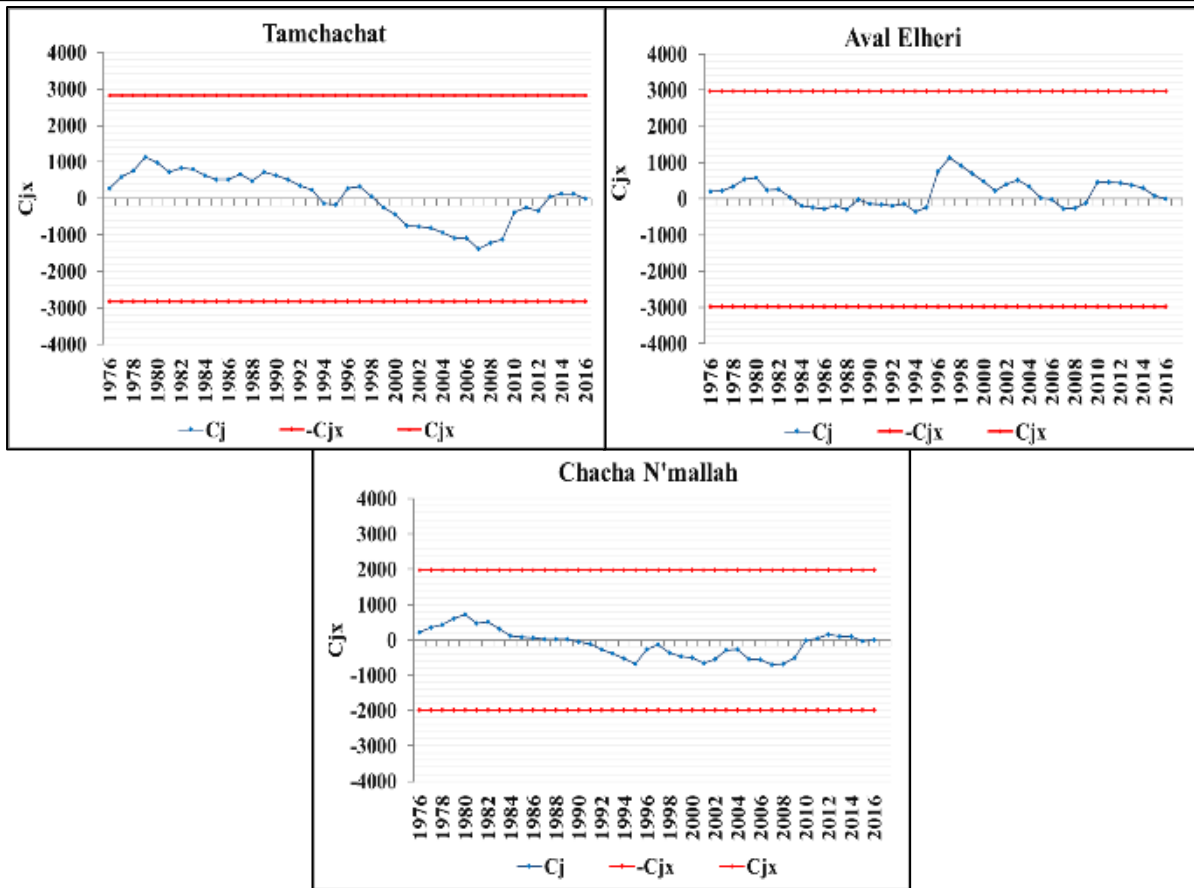


Figure 4-10: Application de la méthode Cusum sur les données des stations pluviométriques (Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah) pour la chronique 1976-2016

L’analyse des données pluviométriques pour les stations du bassin versant de l’oued de Srou et la stations Tamchachat a montré que la chronique étudiée est homogène (Figure 4-11).

Conclusion du chapitre 4

Les séries de données choisies pour cette étude sont de bonne à très bonne qualité. Ceci est montré par le coefficient de corrélation R^2 élevé. Les tests d'homogénéisation réalisés sur l'ensemble des stations montrent que ces derniers appartiennent au même contexte climatique avec des légères fluctuations régionales. Les stations de courte séries ou incomplètes sont directement éliminer. Trois stations retenues pour l'étude des précipitations, et deux stations pour l'analyse des débits au niveau du bassin versant sur deux chroniques de 1976 à 2016 et de 1986 à 2016 avec des données journalières, mensuelles et annuelles complets. Les séries de température et de l'évaporation ont une chronique disponible courte de 1986 à 2016.

Chapitre 5 : Mise au point sur les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Introduction du chapitre 5

Axe 11 : Analyse de la variabilité pluviométrique du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Axe 12 : Température et Evapotranspiration dans le bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016).

Axe 13 : Zoom sur le bilan hydrique du bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016)

Conclusion du chapitre 5

Introduction du chapitre 5

La variabilité des précipitations agit directement sur l'alimentation des nappes phréatiques et sur les régimes hydrologiques des cours d'eau. L'analyse de cette variabilité à une échelle spatio-temporelle est nécessaire pour la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'oued de Srou et ses affluents.

L'objectif de cette étape est la quantification des entrées pluviométriques dans le bassin versant qui sont capables d'alimenter l'écoulement superficiel et souterrain ainsi la détermination de la variabilité dans le temps et dans l'espace et d'identification des régions pluviométriques.

Dans le premier axe une analyse de la variabilité temporelle de la pluviométrie va être réalisée à quatre échelles : annuelle, saisonnière, mensuelle et journalière. L'analyse va concerner les chroniques 1976-2016 et 1986-2016.

Le deuxième axe sera consacré à l'analyse de la température et l'évaporation du bassin versant de l'oued de Srou. En effet, la température est le deuxième paramètre qui caractérise le climat d'une région après les précipitations. Elle agit sur les écoulements à travers l'évaporation, cette dernière va réellement dessiner les caractéristiques saisonnières hydrologiques. Dans le but de déterminer le régime et les tendances des températures dans le bassin de Srou, nous avons effectué une analyse à l'échelle annuelle et à l'échelle mensuelle pour les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali. La méthodologie suivie est basée sur une analyse des données de la chronique disponible dans les deux postes (1986-2016), soit 31ans d'observation.

Dans le troisième axe nous allons essayer de faire un zoom sur le bilan hydrique dans le bassin versant de l'oued de Srou sur la base des analyses de la pluviométrie et de la température.

Axe 11 : Analyse de la variabilité pluviométrique du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

De nombreuses études sur la variabilité pluviométrique sont réalisées dans la région du Moyen-Atlas central, que le bassin versant de l'oued de Srou fait partie. Notant à titre d'exemple l'étude hydro-climatique de SERBOUT (2001) réalisée sur le haut bassin de l'oued Oum-Er-Rbia, l'étude de NEJJARI (2002) sur les sécheresses dans le haut Sebou, le travail de MORCHID ET EL GHACHI (2015) sur les tendances pluviométriques de la ville de Khénifra. On cite également les travaux récents d'ELORFI ET AL., (2020) et ADELL ET AL., (2021). L'ensemble de ces travaux ont mentionnés sur l'importante variabilité pluviométrique observé dans la zone et la tendance globale vers la diminution des précipitations.

Suit au questionnaire réalisé dans la région du bassin versant de l'oued de Srou, nous avons trouvé que 75 % de la population de l'échantillon ont ressenties une baisse dans les apports pluviométriques. La chronique la plus sèche dans le bassin est celle des années 80. Cependant, la plus humide est la période des années 70. En ce qui concerne la durée des épisodes pluviométriques, aussi ont connu diminution marquante. En effet, selon 45 % de la population les épisodes pluviométriques ont duré des semaines consécutives. Les années le plus humides dans le bassin versant de l'oued de Srou sont les années 1990, 1996, 2004, 2010 et 2014.

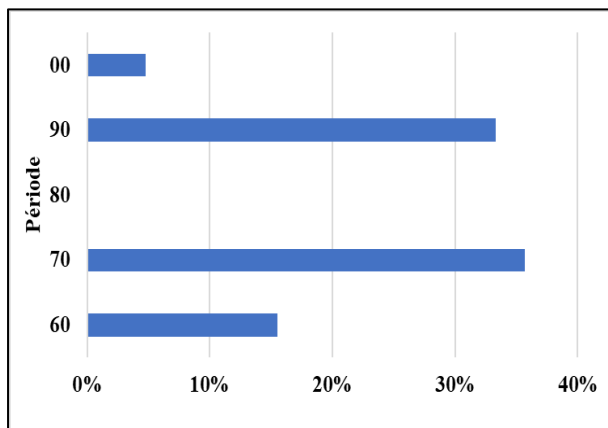


Figure 5-2: Périodes humides dans le bassin versant de l'oued de Srou

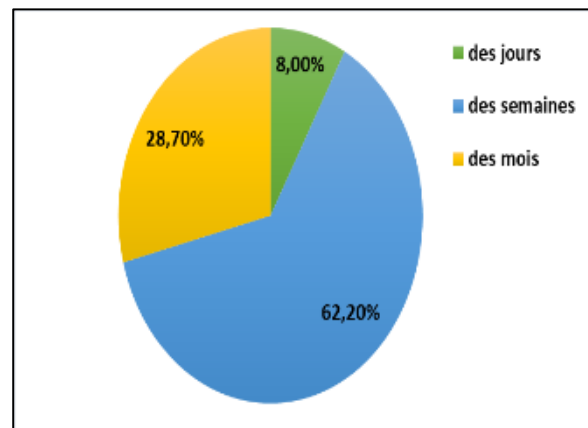


Figure 5-2: Durée des périodes pluvieuses dans le passé dans le bassin versant de l'oued de Srou

Nous allons essayer d'analyser la variabilité et la tendance pluviométrique suite aux analyses statistiques des séries de données pluviométriques des stations du bassin versant de l'oued de Srou.

1. Pluviométrie à l'échelle annuelle

L'analyse des précipitations annuelles a pour but d'extraire les variations temporelles, ainsi de tirer l'information climatique apportée par l'échantillon. Il arrive quelquefois que la

pluviométrie annuelle soit relativement différente et soumise à des variabilités spatiales. Nous allons essayer de montrer cette variabilité à partir des chroniques 1976-2016 et 1986-2016 dans les trois stations de Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah.

1.1. Spatialisation des pluies annuelles (1976-2016)

La connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant est tributaire d'une quantification spatialisée des précipitations. Cette dernière dépend étroitement du type du modèle et de son mode de gestion géographique (LY & AL., 2013). Plusieurs méthodes existent, elles sont basées sur des statistiques spatiales qui mettent en relation la variable à expliquer et les variables explicatives. Le problème majeur devant l'utilisation des méthodes de spatialisation est l'éloignement des stations de mesures dans un contexte spatial de nature montagneuse. La topographie conditionne la structure spatiale des pluies par l'effet orographique qui bloque et condense les masses d'aires humides sur les versants (CHOW & AL., 1988). Généralement, on observe une concentration des précipitations avec l'altitude au niveau des régions qui sont exposées aux vents occidentaux, qui est le cas pour le bassin versant de l'oued de Srou.

NAJJARI (2002) a testé plusieurs méthodes de spatialisation sur un bassin voisin du notre, qui présente les mêmes caractéristiques climatiques et orographiques, c'est celui du haut Sebou. Nous nous basons sur les conclusions de ce test. Les systèmes d'informations géographiques permettent l'utiliser des modèles qui combine à la fois les données pluviométriques et les variables explicatives de cette dernière comme la topographie issue des MNT. On utilisera la méthode de Thiessen, la méthode Krigeages et la méthode d'inverse distance.

- ***Application de la méthode de Thiessen***

C'est une méthode simple définie comme : « *une méthode arithmétique dans laquelle on attribue à chaque pluviométrie un poids proportionnel à une zone d'influence présumée, tel qu'un point toute autre pluviométrie* » (ROCHE, 1963). Le principe est bien détaillé par (REMENIERAS, 1986) : « *Au milieu de chacune des droites qui lient les stations, on prend les médiatrices dont les intersections déterminent des polygones. En général, on calcule la surface du polygone élémentaire ainsi affectée à chaque station en pourcent de la surface totale du bassin. C'est ce pourcentage qui sert de coefficient de pondération propre à chaque station* ». Pour calculer la pluie moyenne, nous avons appliqué la méthode de calcul suivante :

| | |
|--|--|
| $P_{moy} = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{A}$ | Avec P _{moy} : pluie moyenne dans le bassin en mm A : superficie globale du bassin en Km ² A _i : superficie du polygone en Km ² |
|--|--|

Cette méthode est applicable dans les régions à faible contraste hypsométrique, elle dépend de la fiabilité des données et la densité des stations (EL GHACHI, 2007). L'application de la méthode est réalisée à l'aide du logiciel ArcGis. Les résultats sont présentés sur la carte (Figure 5-3).

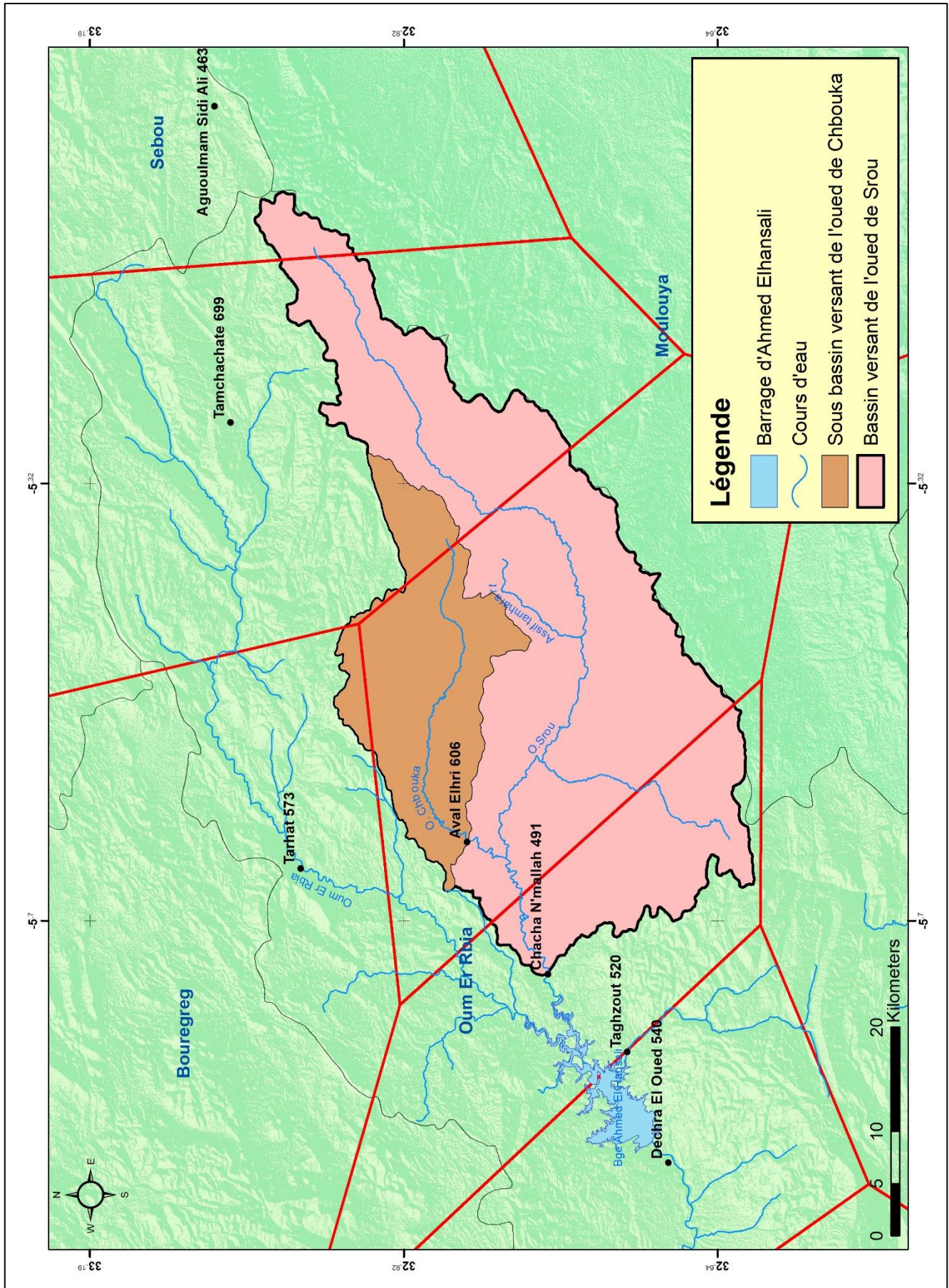


Figure 5-3 : Spatialisation des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou (Méthode de Thiessen) (1976-2016) (MNT 2016)

Le tableau (5-1) présente les résultats des pluies spatialisées dans l'ensemble du bassin versant de l'oued de Srou par la méthode de Thiessen sur la chronique 1976-2016.

Tableau 5-1: Evaluation des précipitations annuelles (chronique 1976-2016) par la méthode de Thiessen

| | | Sous bassin versant de l'oued de Chbouka | | Bassin versant de l'oued de Srou | |
|--------------------------------------|------------------|--|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | | Pi (mm) | Ai (km ²) | Pi (mm) | Ai (km ²) |
| Stations | Chacha N'mallah | 491 | - | 491 | 231,9 |
| | Aval Elhri | 607 | 153,67 | 607 | 782,1 |
| | Taghat | 573 | 10,81 | 573 | 20,9 |
| | Tamchachat | 699 | 143,67 | 699 | 294,7 |
| | Agulmam Sidi Ali | 463 | - | 463 | 29 |
| | Midelt | 201 | - | 201 | 13,3 |
| P_{moy} annuelle (mm) | | 650 | | 600 | |

Trois régions observées, une en amont plus humide avec une moyenne de 699 mm, une deuxième au milieu moyennement humide avec une moyenne de 607 mm et la dernière en aval plus sèche de moyenne de 491 mm.

Les moyennes obtenues par la spatialisation de Thiessen sont plus importantes que la pluviométrie mesurée dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou. Au niveau du sous bassin versant de l'oued de Chbouka ; la pluie moyenne calculée par la méthode de Thiessen est de l'ordre de 650 mm, donc elle est supérieure à la moyenne avec 44 mm. Au niveau du bassin versant de l'oued de Srou l'écart entre les pluies spatialisée et les pluies mesurées dans la station de Chacha N'mallah est important, il est de l'ordre de 110 mm.

- **Application de la méthode Inverse distance**

L'interpolation par la méthode des polygones de Thiessen ne prend en compte que les sites d'observation voisins pour estimer une valeur non observée directement. En conséquence, elle se prive d'une grande quantité d'informations disponibles. La méthode de l'inverse distance prend en compte un plus grand nombre de données, en affectant une pondération plus élevée aux valeurs proches qu'aux valeurs éloignées. Généralement, la technique utilisée est celle de l'interpolation linéaire après triangulation, où chaque station constitue le sommet d'un réseau de triangles couvrant la totalité du territoire à analyser. Les valeurs sont ensuite interpolées linéairement sur chacun des côtés des triangles en fonction de la distance entre les sites d'observation (SHEPARD, 1968). Les pluies moyennes sont calculées par la relation suivante :

| | |
|---|--|
| $P_{moy} = \sum \left(\frac{S_i * P_i}{S} \right)$ | Avec - P _{moy} : pluie moyenne en mm - S _i : surface du sous bassin en Km ² - P _i : pluie |
|---|--|

En générale cette méthode permis de distinguer aussi trois zones de pluviométrie différente. Une au nord-ouest du bassin avec des moyennes très importantes, une autre au médian du bassin moyennement arrosé et la dernière en aval avec une pluviométrie faible (Figure 5-4).

L'application de la méthode dans le bassin versant de l'oued de Srou sur la chronique 1976-2016 a donné les résultats suivants :

Tableau 5-2: Résultat de l'évaluation des précipitations annuelles (chronique 1976-2016) par la méthode d'Inverse distance

| Bassins | Pluviométrie moyenne (Inverse distance) en mm |
|--|---|
| Sous bassin versant de l'oued de Chbouka | 588 |
| Bassin versant de l'oued de Srou | 566 |

Le tableau (5-2) présente les résultats de cette spatialisation par bassin, la pluviométrie dans le sous bassin de l'oued de Chbouka est de l'ordre de 588 mm. Cette valeur est inférieure à la moyenne observée dans la station d'Aval Elhri (606 mm). Alors que la pluviométrie dans le bassin versant de l'oued de Srou est de l'ordre de 566 mm qui est supérieure à la moyenne enregistrée dans la station de Chacha N'mallah (490 mm).

Cette méthode présente théoriquement plusieurs points faibles. Les valeurs interpolées sont toujours comprises entre la valeur minimale et la valeur maximale, et elle ne tient compte que de la distance entre les sites d'observation et le point à estimer, et non de la configuration géométrique des sites d'observation entre eux. Cela implique que la représentativité de l'interpolation est directement corrélée à la densité du réseau (d'ailleurs ce qui n'est pas spécifique à cette méthode).

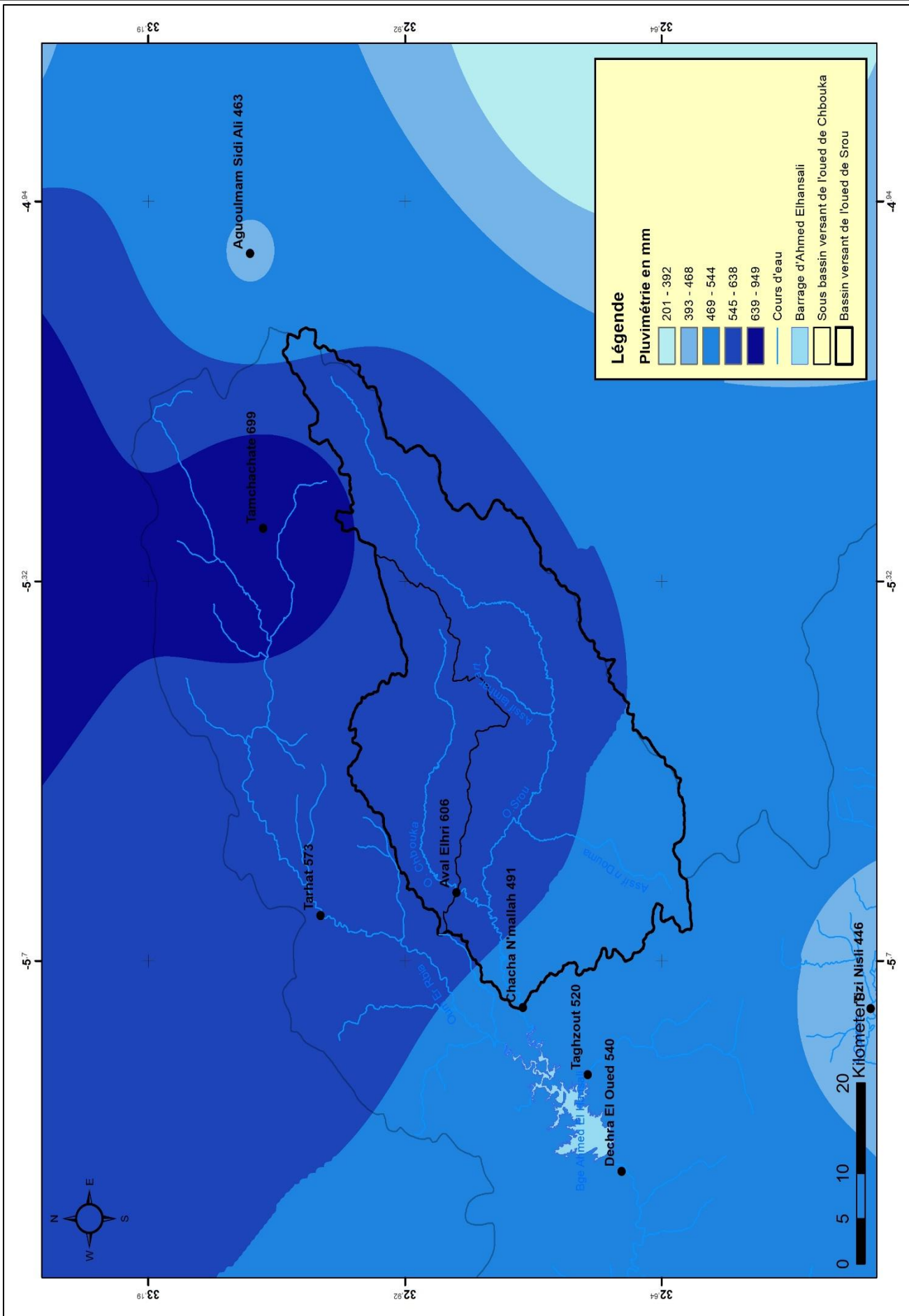


Figure 5-4 : Spatialisation des pluies annuelles dans le bassin versant de l’oued de Srou (Méthode d’Inverse distance) (1976-2016) (MNT 2016)

Application de la méthode Krigeage

Le Krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure spatiale propre à la variable estimée (LABORDE, 2000). Ce qui distingue le Krigeage des autres techniques, c'est qu'il est le seul à tenir compte de la structure de dépendance spatiale des données. Ainsi, pour beaucoup d'auteurs, le Krigeage génère les prévisions spatiales les plus justes et l'estimation des erreurs qu'il produit est plus fiable que celles produites par les autres méthodes stochastiques. Pour la communauté scientifique, le Krigeage ressortirait donc gagnant de la comparaison avec les autres méthodes d'interpolation (ARNAUD ET EMERY, 2000 ; BAILLARGERON, 2005). La méthode est réalisée sous le logiciel Arcgis, l'estimation des pluies par sous bassin est faite par la relation suivante

| | |
|---|--|
| $P_{moy} = \sum \left(\frac{S_i * P_i}{S} \right)$ | Alors <ul style="list-style-type: none"> - P_{moy} : pluie moyenne en mm - S_i : surface du sous bassin en Km² - P_i : pluie |
|---|--|

La méthode Krigeage donne des résultats proches à ceux fournis par la méthode d'Inverse distance (Tableau 5-3).

Tableau 5-3: Résultat de l'évaluation des précipitations annuelles (chronique 1976-2016) par la méthode Krigeage

| Bassin | Pluviométrie moyenne (krigeage) en mm |
|--|---------------------------------------|
| Sous bassin versant de l'oued Chbouka | 580 |
| Bassin versant de l'oued de Srou | 537 |

D'une façon générale, les trois méthodes donnent des résultats presque identiques. Elles ont caractérisé trois régions pluviométriques dans le bassin versant de l'oued de Srou ; une au nord-ouest la plus arrosée, la deuxième en milieu du bassin avec une grande superficie moyennement arrosée et la dernière en aval et qui reçoit des faibles précipitations. Le Sous bassin versant de l'oued de Chbouka reçoit des quantités plus importantes de pluies (Figure 5-5).

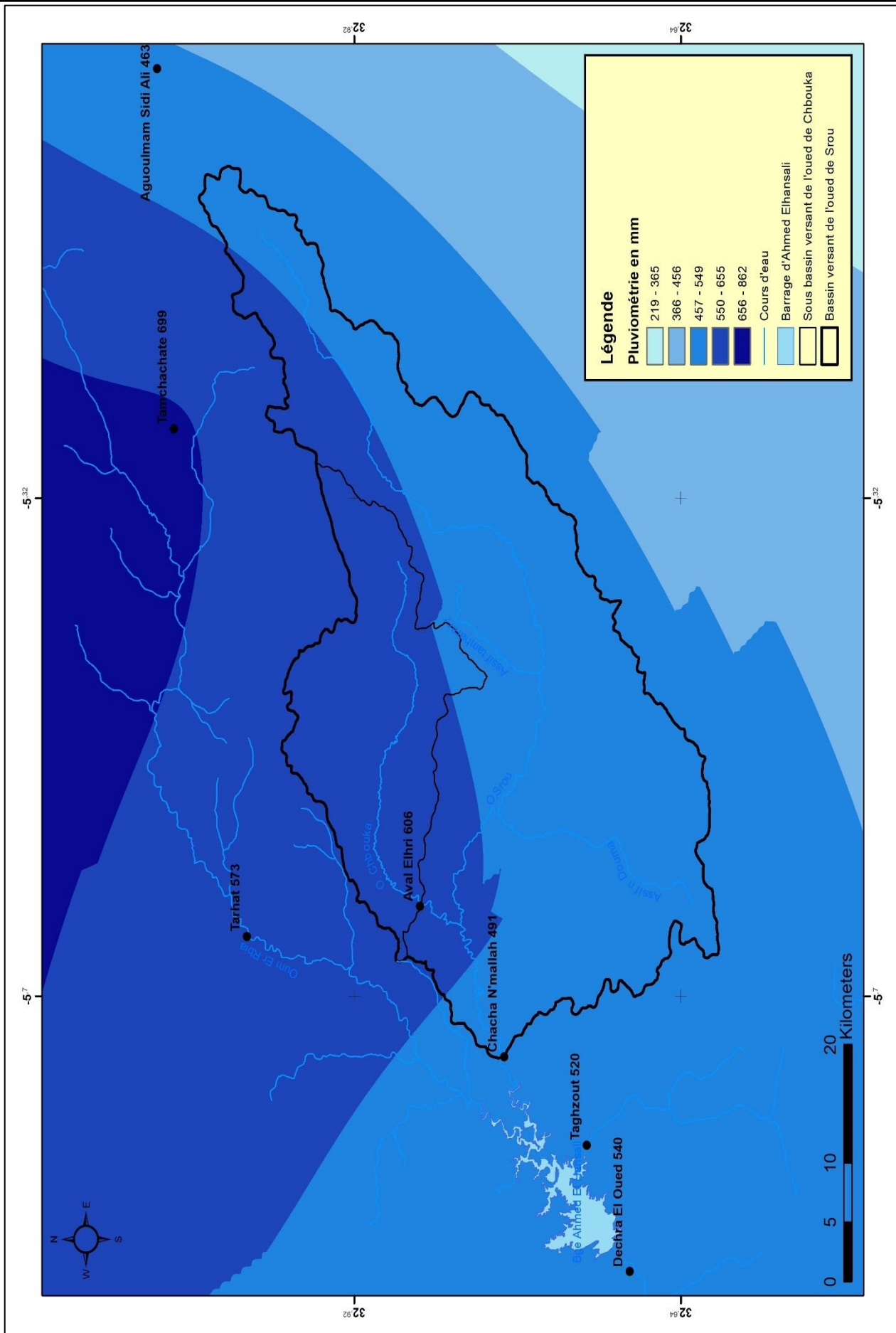


Figure 5-5 : Spatialisation des pluies annuelles dans le bassin versant de l’oued de Srou (Méthode Krigeage) (1976-2016) (MNT 2016)

1.2. Analyse de la variabilité interannuelle de la pluviométrie

Les moyennes interannuelles de la chronique 1976-2016 observées pour les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah sont respectivement ; 699 mm, 606 mm et 490 mm. L'année 2010 est l'année la plus humide au niveau des stations de Tamchachat et Chacha N'mallah, alors que l'année 1996 est la plus humide au niveau de la station d'Aval Elhri. L'année 1981 est la plus sèche pour les stations Aval Elhri et Chacha N'mallah, mais pour la station Tamchachat l'année 1993 est la plus sèche de la chronique (Figure 5-6).

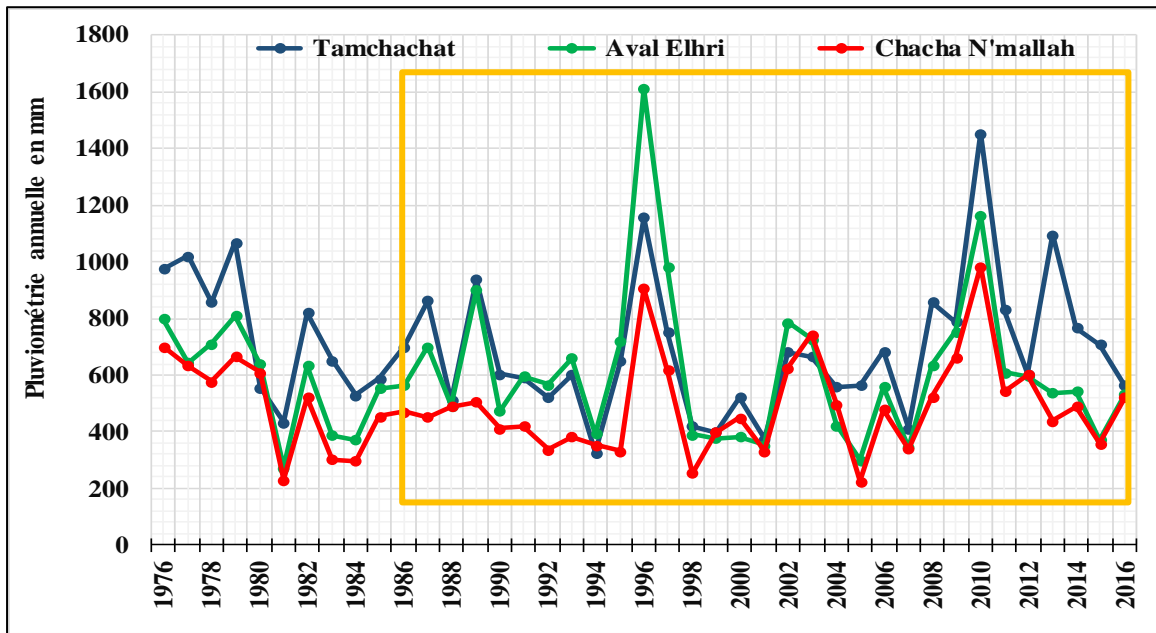


Figure 5-6: La pluviométrie annuelle dans les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah

Sur la chronique d'observation dans les trois stations, plus de 56 % des années sont en dessous de la moyenne (années sèches), tandis que seulement 44 % dépassent la moyenne (années humides) (Tableau 5-4). La variation dans la station d'Aval Elhri (41,3 %) est la plus importante parmi les stations du bassin versant de l'oued de Srou. Les stations de Tamchachat et de Chacha N'mallah possèdent des Cv de variation faibles.

Tableau 5-4: Variabilité de la pluviométrie moyenne annuelle dans les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

| Station | Moyenne en mm | Ecart-type en mm | Coefficient de variation | Nombre des années | |
|-----------------|---------------|------------------|--------------------------|-------------------|--------|
| | | | | humides | sèches |
| Tamchachat | 699 | 235 | 34.02 % | 17 | 24 |
| Aval Elhri | 606 | 247 | 41.3 % | 18 | 23 |
| Chacha N'mallah | 490 | 165 | 34.07 % | 18 | 23 |

Pour la chronique 1986-2016 les moyennes pluviométriques oscillent entre 682 mm au niveau de la station de Tamchachat et 488 mm dans la station de Chacha N’mallah.

Tableau 5-5 : Variabilité de la pluviométrie moyenne annuelle dans les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N’mallah (1986-2016)

| Station | Moyenne | Ecart-type | Coefficient de variation |
|-----------------|---------|------------|--------------------------|
| Tamchachat | 683 | 239 | 35 % |
| Aval Elhri | 614 | 267 | 43 % |
| Chacha N’mallah | 488 | 167 | 34 % |

La variabilité pluviométrique des moyennes annuelles ne permet pas de mettre en évidence les tendances sèches et humides. Pour cela, on fait appel à l’indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d’ordre 2.

• **Analyse de l’évolution de la pluviométrie par l’indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d’ordre 2.**

La méthode adoptée a déjà fait l’objet des travaux antérieurs dans différents bassins versants comme celui de la Lobo au centre ouest de la Côte d’Ivoire (YAO ET AL., 2012), de l’Oubangui au Centre Afrique (NGUIMAL ET ORANGE, 2015) et aussi de l’Oum-Er-Rbia au Maroc (JUILIL ET AL., 2013) et de Sebou (BAUDET ET AL., 2017).

La mise en évidence de la variabilité pluviométrique par l’indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d’ordre 2 permet à travers l’exploitation des données pluviométriques obtenues pour une série de mesures de 41 ans de mettre en évidence les tendances pluviométriques et de différencier les périodes déficitaires des périodes excédentaires (SORO ET AL., 2011).

- Indice de NICHOLSON

L’indice de Nicholson calculé pour chaque année est exprimé par l’équation suivante (NICHOLSON ET AL., 1989) :

Cet indice mesure l’écart par rapport à une moyenne établie sur une longue période en se référant aux données des stations. L’indice annuel est la variable centrée réduite des moyennes pluviométriques annuelles. Il est obtenu, par calcul, à l’aide de la formule de l’équation (1) :

| | |
|--------------------------------|--|
| $I = (X_i - X_m) / \sigma$ (1) | Avec - X_i : Pluviométrie de l'année i - X_m : Pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence - σ : Écart type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence. |
|--------------------------------|--|

- Filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2 « moyennes mobiles pondérées »

Cette méthode permet d'éliminer les variations saisonnières dans une série chronologique donnée. La moyenne mobile pondérée est calculée par l'équation ci-dessous (ASSANI, 1999).

$$X(t) = 0,06x(t-2) + 0,25x(t-1) + 0,38x(t) + 0,25x(t+1) + 0,06x(t+2) \quad (2)$$

Pour $3 < t < (n-2)$

$$\begin{aligned}
 X(1) &= 0,54X(1) + 0,46X(2) \quad (3) \\
 X(2) &= 0,25X(1) + 0,5X(2) + 0,25X(3) \quad (4) \\
 X(n-1) &= 0,25X(n-2) + 0,5X(n-1) + 0,25X(n) \quad (5) \\
 X(n) &= 0,54X(n) + 0,46X(n-1) \quad (6)
 \end{aligned}$$

Où $X(t)$ est le total pluviométrique pondéré du terme t ; $X(t-2)$ et $X(t-1)$ sont les totaux pluviométriques principaux observés des deux termes qui précèdent immédiatement le terme t . $X(t+2)$ et $X(t+1)$ sont les totaux pluviométriques observés des deux termes qui suivent immédiatement le terme t . Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers [$X(1)$, $X(2)$] et des deux derniers [$X(n-1)$, $X(n)$] termes de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes (n étant la taille de la série) :

Pour mieux visualiser les périodes déficitaires et d'excédentaires, les moyennes mobiles centrées et réduites sont calculées à partir de l'équation (7)

$$Y'_t = (X(t) - m) / (7)$$

Où m est la moyenne de la série des moyennes pondérées et l'écart type de la série des moyennes mobiles pondérées. Cette méthode apparaît plus efficace car elle permet de découper de façon perceptible les séries. Les graphes de la figure (5-7) montrent les résultats de la méthode.

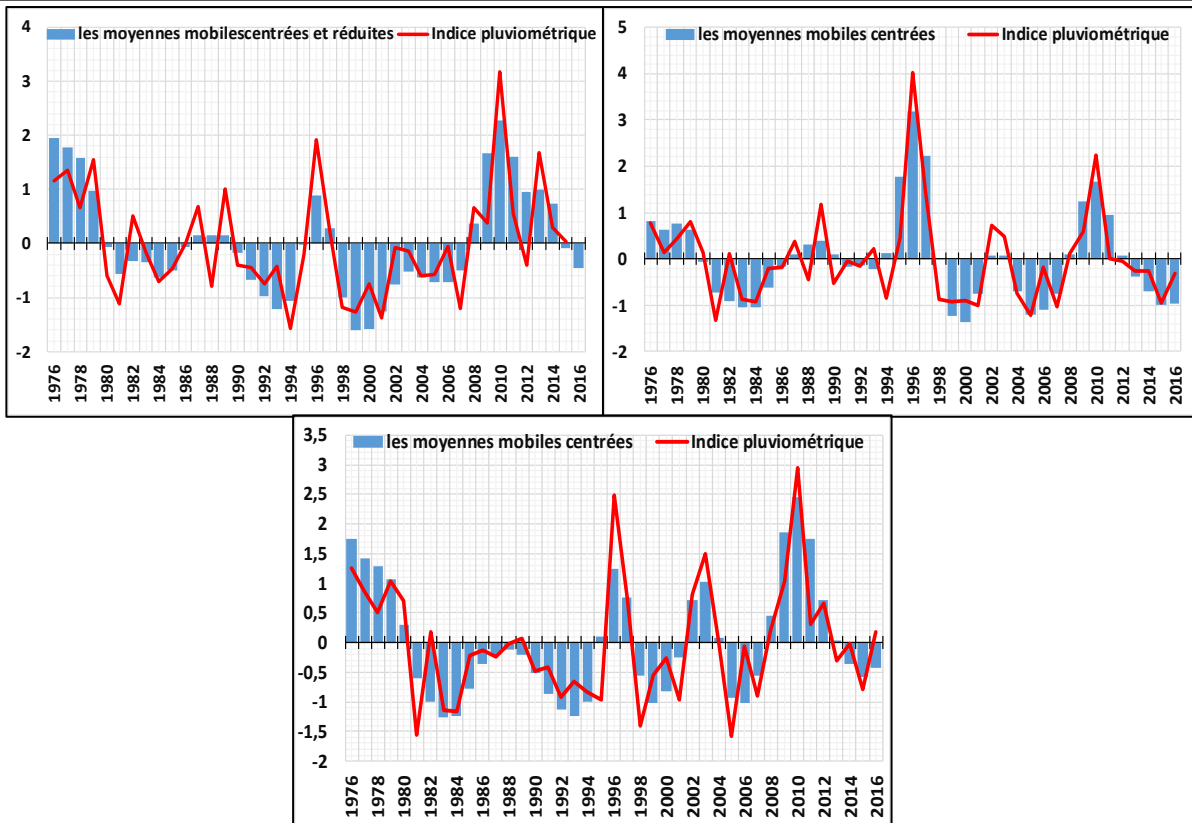


Figure 5-7: Evolution interannuelle de la pluviométrie à Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah avec les indices centrés réduits et les totaux annuels pondérés (1976-2016)

Tableau 5-6: Découpage de la chronique pluviométrique (1976-2016) des trois stations ; Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah

| Station | Moyen de la série P en mm | Années | Durée | Moyen de la durée P en mm | P'/P | Type |
|-----------------|---------------------------|-----------|-------|---------------------------|------|---------|
| Tamchachat | 699 | 1976-1980 | 5 | 895,8 | 1,2 | humide |
| | | 1981-1986 | 6 | 620,5 | 0,8 | sèche |
| | | 1987-1990 | 4 | 728,7 | 1 | Normale |
| | | 1991-1995 | 5 | 537,9 | 0,7 | sèche |
| | | 1996-1997 | 2 | 953,7 | 1,3 | humide |
| | | 1998-2007 | 10 | 527,7 | 0,7 | sèche |
| | | 2008-2014 | 7 | 882,1 | 1,2 | humide |
| | | 2015-2016 | 2 | 635,2 | 0,9 | sèche |
| Aval Elhri | 606 | 1976-1979 | 4 | 720,6 | 1,2 | humide |
| | | 2004-2007 | 4 | 406,5 | 0,7 | sèche |
| | | 2008-2011 | 4 | 790,5 | 1,3 | humide |
| | | 2012-2016 | 5 | 515,5 | 0,9 | sèche |
| Chacha N'mallah | 490 | 1976-1980 | 5 | 636,9 | 1,3 | humide |
| | | 1981-1994 | 14 | 401,7 | 0,8 | sèche |
| | | 1995-1997 | 3 | 617,9 | 1,3 | humide |
| | | 1998-2001 | 4 | 358,6 | 0,7 | sèche |
| | | 2002-2004 | 3 | 621,9 | 1,3 | humide |
| | | 2005-2007 | 3 | 347,7 | 0,7 | sèche |
| | | 2008-2013 | 6 | 625,5 | 1,3 | humide |
| | | 2014-2016 | 3 | 455,6 | 0,9 | sèche |

Les variations interannuelles de la pluviométrie aux stations de Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N’mallah sont caractérisées par une alternance de période humide, de période normale et de période sèche qui sont de durée variable avec des alternances d’années humides et d’années sèches (Tableau 5-6).

On remarque que la pluviométrie au niveau des trois stations montre sensiblement une évolution identique avec les mêmes périodes humides et sèches. Toutefois, l’intensité et la durée de ces pluies montrent une différence considérable. De légères différences apparaissent aussi au niveau de la distribution des périodes sèches et humides (GHADBANE ET AL., 2021)

1.3. Etude fréquentielle de la pluviométrie annuelle dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

L’étude fréquentielle de la pluviométrie permet d’analyser de l’occurrence d’événements extrêmes ayant une portée probabiliste pour les événement futurs (MEYLON ET AL.,2008 ; GIRET, 2007). Ces résultats prédictifs sont très importants dans notre travail. Ils visent à la proposition des solutions en gestion.

L’étude fréquentielle demande de suivre une certaine méthodologie, tout d’abord il faut effectuer un arrangement des valeurs de l’échantillon par ordre croissant en donnant à chaque variable son rang dans la série. Ensuite, nous calculons la fréquence expérimentale pour chaque variable par la relation suivante :

| | |
|----------------------------|---|
| $F(x) = (r-0,3) / (N+0,4)$ | Avec - r : le rang de chaque valeur - N : effectif de l’échantillon |
|----------------------------|---|

- **Fréquence et ajustement des données pluviométriques à une loi statistique**

L’étude fréquentielle des pluies annuelles des stations de Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N’mallah permet de mettre en évidence les classes de pluies qui se répètent le plus dans la zone sur la chronique d’étude (Figure 5-9).

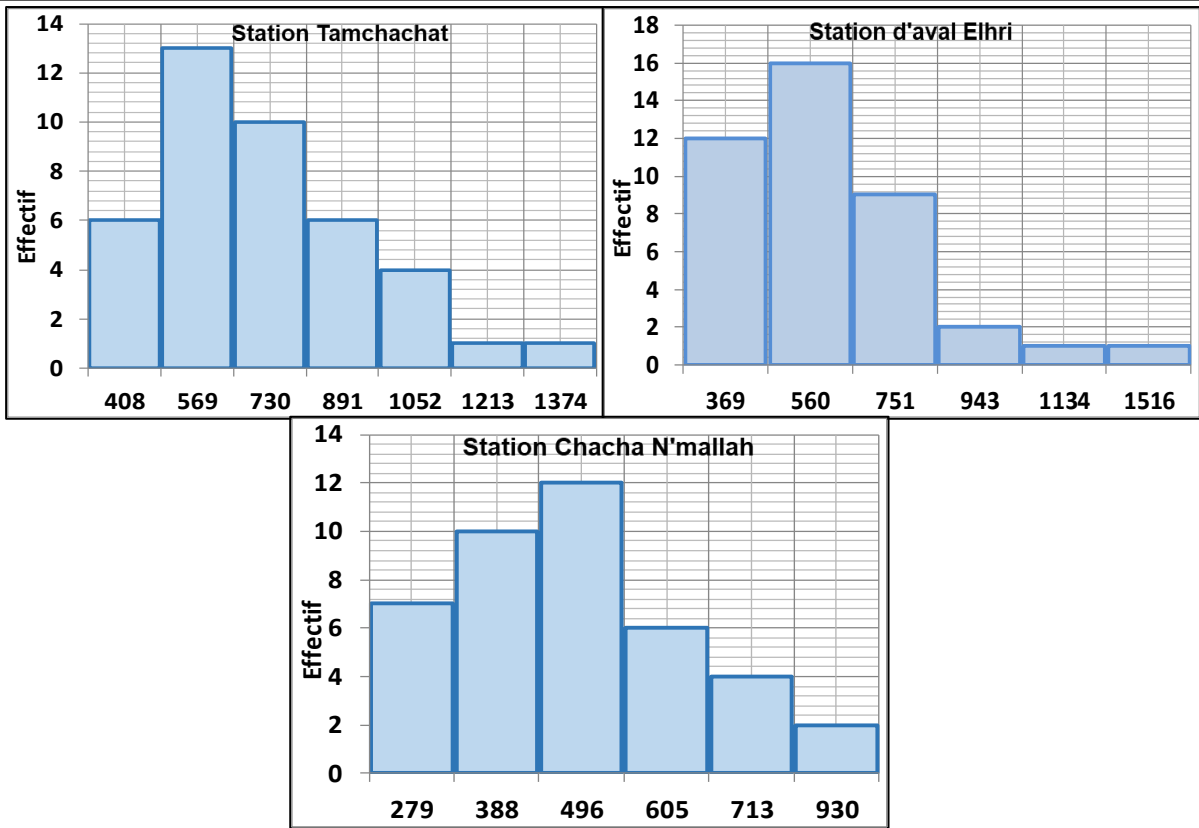


Figure 5-9: Fréquence des pluies annuelles des stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la chronique (1976-2016)

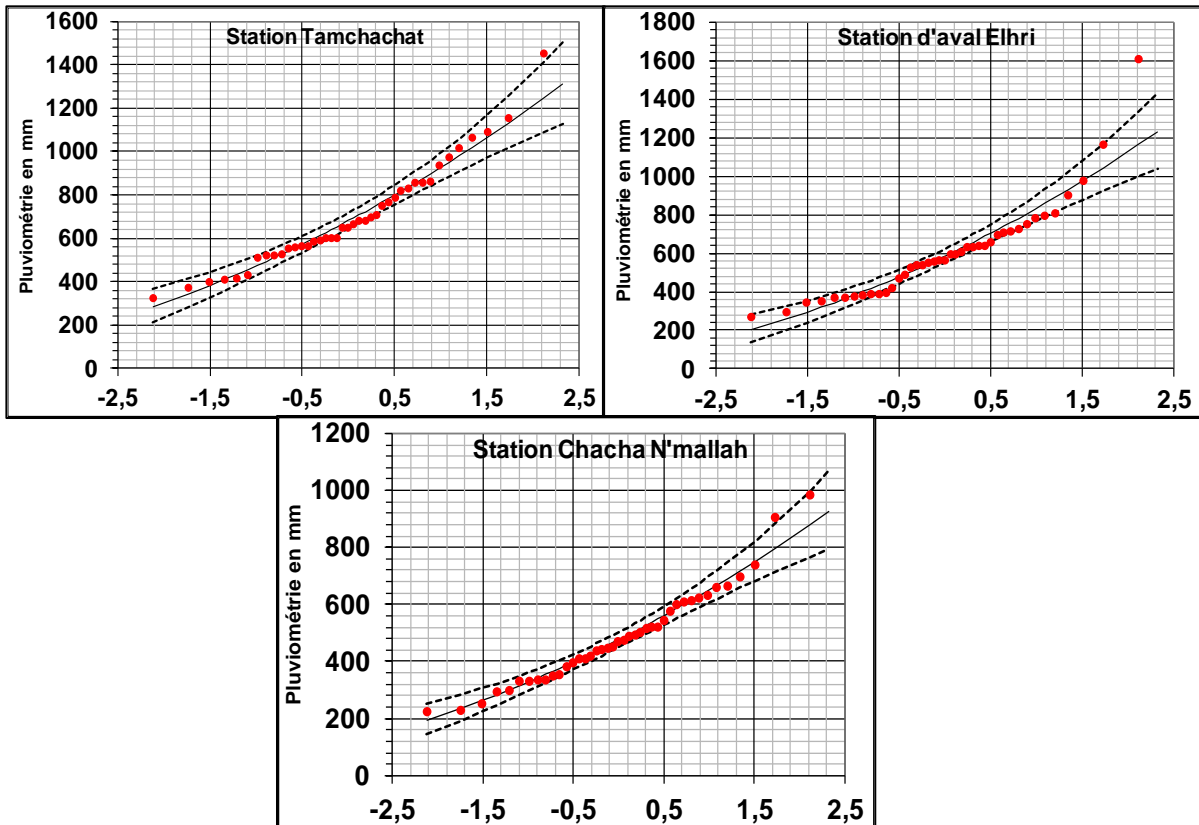


Figure 5-8: Ajustement statistique des pluies annuelles des stations du bassin versant de l'oued de Srou à la loi Rac Normale (1976-2016)

Au niveau de la station de Tamchachat, les classes proches à la moyenne 569 et 730 sont apparues 23 fois sur 41, ce qui signifie que la partie amont est bien alimentée. Dans la station d'aval Elhri les classes inférieures à la moyenne 369 et 560 mm sont apparues 28 fois sur 41. Les valeurs 388 et 496 mm ont une fréquence d'apparition importante par rapport aux autres valeurs dans la station de Chacha N'mallah.

Les données des trois stations du bassin versant de l'oued de Srou ont été ajustées à 6 lois statistiques : la loi Normale, la loi Racine Normale, la loi Log-Normal, la loi Gumbel, loi Pearson et la loi de Weibul. Le test d'ajustement est réalisé par le test d'adéquation du Khi2. Les graphes de la figure (5-8) montrent que les données pluviométriques des trois stations s'ajustent bien à la loi Racine Normale.

- **Calcul des périodes de retours**

L'étude fréquentielle a permis de déterminer les périodes de retours des pluies annuelles et de fournir par la suite des indications intéressantes pour la gestion des ressources de l'eau.

Le tableau (5-7) présente les résultats des calculs des périodes de retours pour les trois stations du bassin versant de l'oued de Srou, pour des durées de retours de ; 2, 5, 10, 20 et 50 années.

Les moyennes de la période d'observation pour les trois stations du bassin versant correspondent à la fréquence $\frac{1}{2}$. Ce qui signifie que ces valeurs ont une durée de retours de 2 ans. Les plus faibles valeurs enregistrées dans les stations de Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah correspondent à une fréquence de $\frac{1}{20}$. Cela veut dire que les sécheresses sévères se produisent une fois tous les 20 ans.

Tableau 5-7: Pluviométrie annuelle fréquentielle dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la période (1976-2016)

| Fréquence | Vers le sec | | | | | Ver l'humide | | | |
|----------------------------|-------------|------|------|-----|-----|--------------|------|------|------|
| | 1/50 | 1/20 | 1/10 | 1/5 | 1/2 | 1/5 | 1/10 | 1/20 | 1/50 |
| Période de retour en année | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 | 50 |
| Tamchachat (mm) | 210 | 307 | 394 | 498 | 699 | 899 | 1003 | 1090 | 1187 |
| Aval Elhri (mm) | 91 | 194 | 285 | 395 | 606 | 817 | 927 | 1018 | 1121 |
| Chacha N'mallah (mm) | 144 | 212 | 273 | 347 | 488 | 629 | 703 | 764 | 833 |

Les maximums pluviométriques des stations du bassin versant ont des fréquences différentes. En effet, la station de Tamchachat (1454 mm en 2010) et la station d'aval d'Elhri (1611 mm en 1996) correspondent à une fréquence de 1/1000. Alors que pour la station de Chacha N'mallah, la valeur maximale enregistrée en 2010 (984 mm) correspond à une fréquence de 1/200.

Donc, d'une façon générale les années humides ont une fréquence d'apparition faible par rapport aux années sèches qui ont des fréquences importantes.

2. Mise au point sur l'analyse de la pluviométrie à l'échelle mensuelle

L'analyse de la pluviométrie annuelle seule peut masquer certaines situations climatiques particulières, qui ont un impact important sur les écoulements dans un bassin versant. Ce qui fait de l'étude de la distribution de la pluviométrie mensuelle une étape primordiale pour pouvoir comprendre l'irrégularité des débits hydrologiques. La présente étude porte sur l'analyse spatiale et temporelle de la pluviométrie mensuelle à l'échelle du bassin versant de l'oued de Srou.

2.1. Spatialisation des pluies mensuelle dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

La spatialisation des pluies mensuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou est réalisée sur la base de la méthode de Krigeage, déjà citée dans la spatialisation des pluies annuelles. Pour chaque station choisie, on a calculé la moyenne de chaque mois pour la chronique de l'étude de 41 ans (1976-2016). Les graphes de la figure (5-10) présentent les résultats des pluies spatialisés sur l'ensemble du bassin.

Les résultats obtenus des pluies spatialisées présentent une concordance presque totale dans le sous bassin de l'oued de Chbouka avec une légère variation pour les mois humides. Dans le

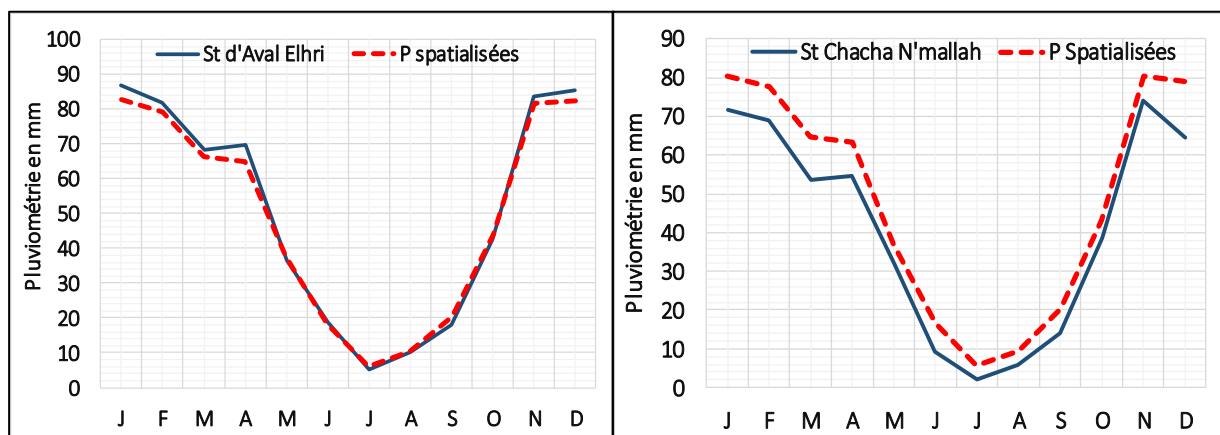


Figure 5-10 : Pluviométrie moyenne mensuelle calculée pour le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et le bassin versant de l'oued de Srou pour la chronique (1976-2016)

bassin versant de l’oued de Srou un décalage est observé entre les pluies spatialisées et celles mesurées dans la station de Chacha N’mallah. Les pluies spatialisées sont supérieures aux pluies mesurées (Figure 5-11).

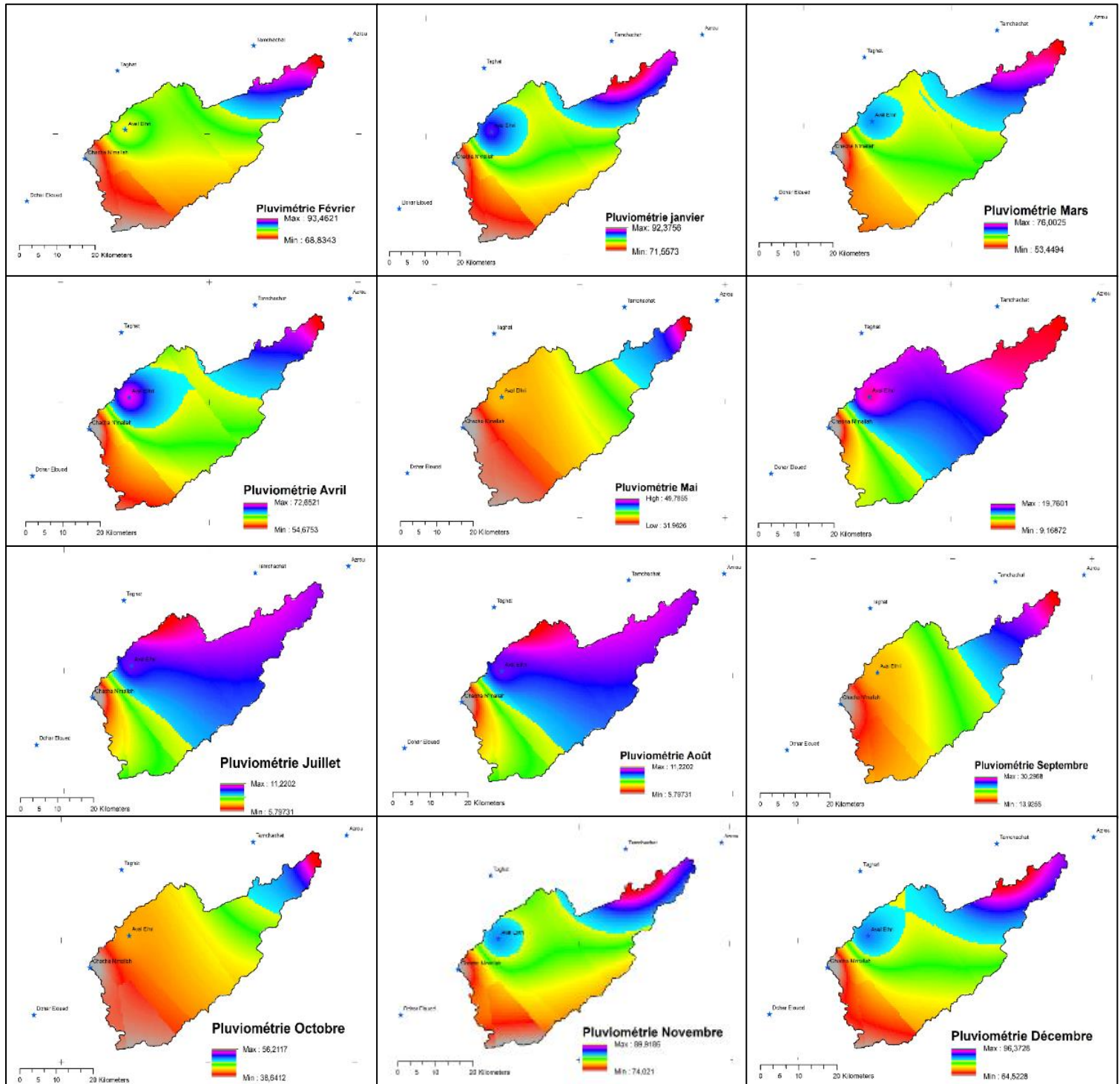


Figure 5-11 : Spatialisation des pluies mensuelles dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

Au niveau du bassin versant de l’oued de Srou, une variation est observée entre l’amont et l’aval. En effet, la région du nord-ouest du bassin est toujours la plus arrosée. Ensuite, le gradient pluviométrique décroît au niveau de la vallée de l’oued Srou. C’est un phénomène qui

peut expliquer par l'effet orographique. L'air subit une ascendance forcée par l'effet du relief. Le versant qui face aux flux zonaux (les westerlies ou les alizés) reçoit d'importantes précipitations.

Un contraste significatif est observé entre les pluies estimées et mesurées. Pour les mois secs la variation est de 3 mm alors que pour les mois humides elle est de l'ordre de 10 mm. La partie du sous bassin versant de l'oued de Chbouka reçoit des précipitations importantes. Les mois de décembre, janvier, février et mars sont les mois les plus humides avec un max en mois de décembre. Les mois de juillet et d'août sont les plus secs.

2.2. Zoom sur le régime pluviométrique du bassin versant de l'oued de Srou

L'étude de la variabilité pluviométrique mensuelle pour les chroniques (1976-2016) et (1986-2016) est exprimée par le CMP : le coefficient mensuel pluviométrique. Il permet de faire un découpage pour déterminer la période hivernale et estivale. Il est le rapport des valeurs mensuelles sur la moyenne de la chronique (MORCHID ET EL GHACHI, 2015) (Figure 5-12).

On terme de résultats nous notons que les valeurs maximales de la pluviométrie sont observées entre les mois de novembre et février. Cependant, les plus faibles valeurs sont enregistrées en mois de juillet les trois stations du bassin versant de l'oued de Srou.

L'analyse des CMP des trois stations du bassin versant de l'oued de Srou pour les deux chroniques d'observation montre que la répartition des pluies au cours de l'année est très inégale. L'année climatique est divisée en deux périodes : une saison humide qui commence en novembre et se termine en avril (les valeurs du CMP sont supérieur à 0,1) et une saison sèche qui débute en mai et se finie en octobre (les CMP sont inférieur à 0,1).

La saison humide représente plus de 80 % de la valeur du module pluviométrique annuelle. Ce qui indique que la région obéit au principe du régime d'un hiver très pluvieux et d'un été relativement sec.

Pendant la saison sèche la moyenne pluviométrique est relativement faible dans les stations du bassin. Elles ne dépassent pas les 20 % du module pluviométrique annuelle. Elles sont généralement observées entre les mois de mai et octobre. Ces pluies sont dues essentiellement aux phénomènes orageux qui caractérisent les régions montagneuses.

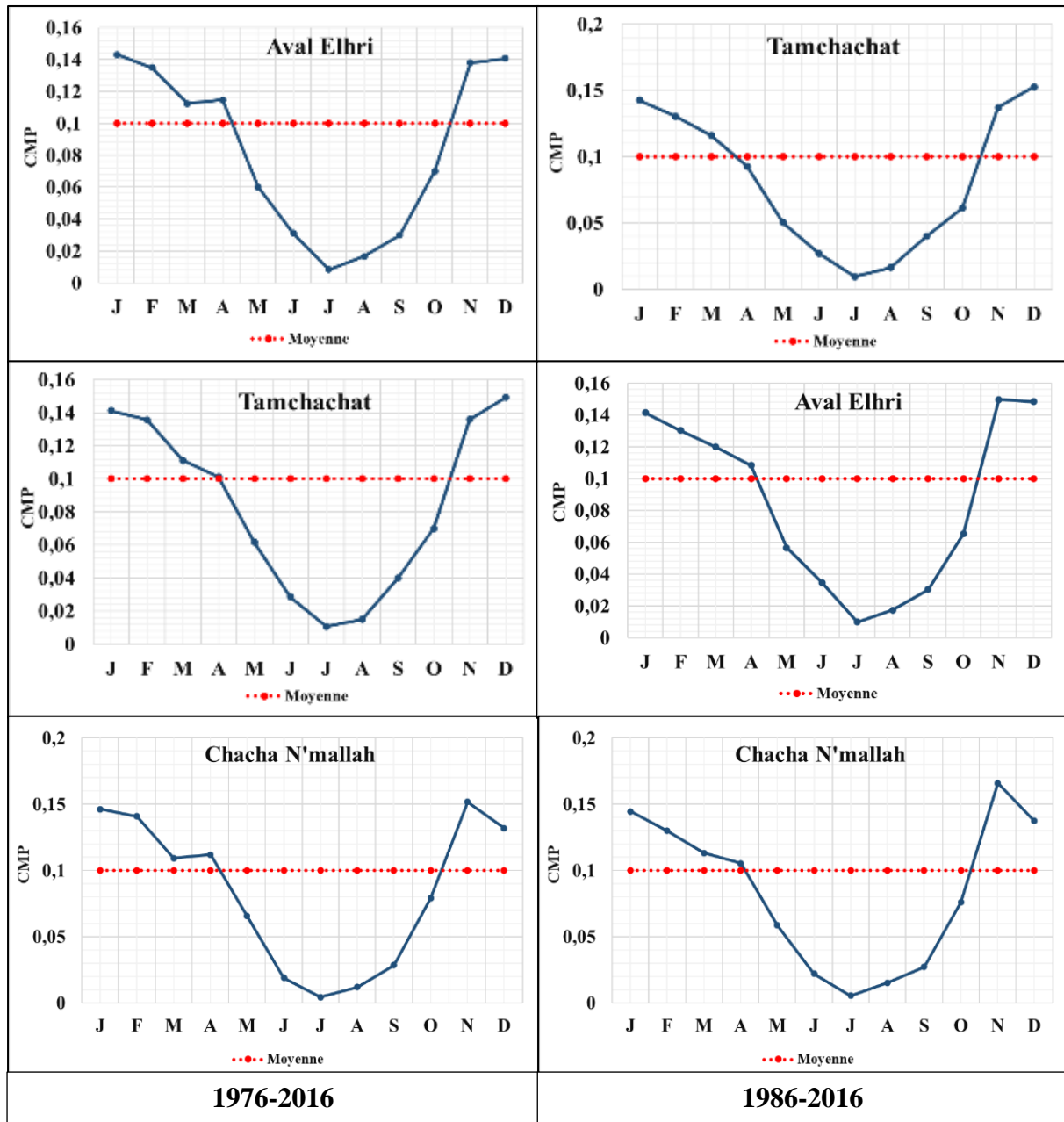


Figure 5-12 : Variation des CMP des stations de Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah

3. Analyse des apports pluviométriques journalières du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Les pluies journalières constituent l'élément de base pour toutes les séries pluviométriques. Elles sont nécessaires dans les analyses hydro-climatiques à une échelle plus fine. L'objectif de cette analyse est de faire une mise au point sur les caractéristiques des hauteurs pluviométriques journalières et d'évaluer leur intensité. L'étude va se limiter sur les données pluviométriques journalières des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (chronique 1976-2016). La station de Tamchachat sera éliminée parce que ne possède pas de séries journalières complètes.

3.1. Extraction des nombres de jours pluvieux et non pluvieux

Le but de cette extraction est la séparation des jours pluvieux du non pluvieux, pour pouvoir déterminer celle qui sont capable de déclencher un écoulement (El Ghachi et al., 2005). Le graphe (Figure 5-13) montre le nombre des jours pluvieux par année et par station. La moyenne des jours pluvieux est 63 jours dans le sous bassin de l'oued de Chbouka, ce qui fait que plus de 82 % des jours de l'année sans secs. Au niveau du bassin versant de l'oued de Srou, les nombre des jours pluvieux et un peu élevé par rapport à celui observé dans le sous bassin de l'oued de Chbouka, il est de l'ordre de 77 jours contre 287 jours sans pluies. Les jours pluvieux représentent seulement 21 % des jours de l'année, ce qui signifie que les jours à secs sont importants.

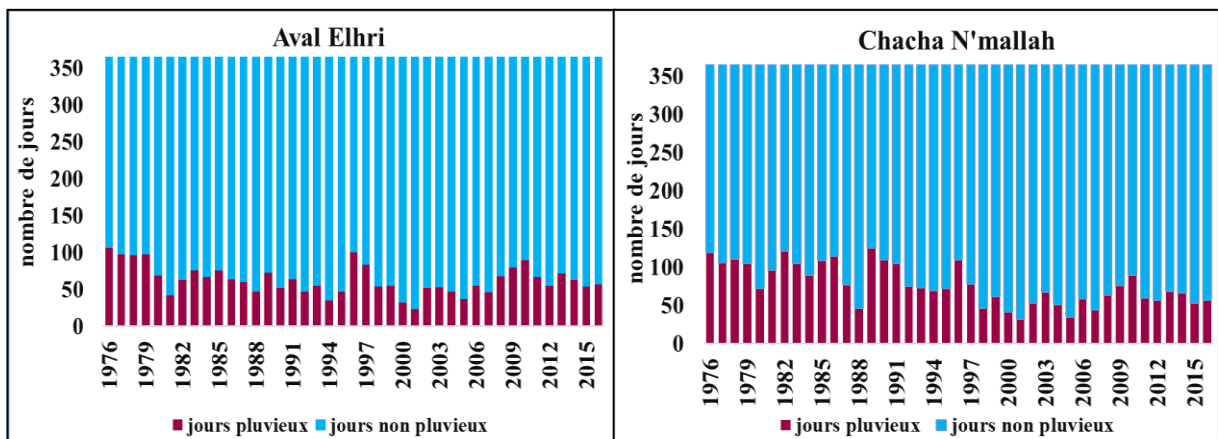


Figure 5-13: Nombre des jours pluvieux et non pluvieux dans les stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

Le nombre maximal des jours pluvieux est observé en 1976 dans la station d'aval Elhri (106 jours), et en 1989 dans la station de Chacha N'mallah (125 jours). Le nombre minimal des jours sans pluies est enregistré dans la même année (2001) dans les deux stations ; il est de l'ordre de 23 jours dans le Chbouka et 32 jours dans le Srou.

Ces résultats ne sont pas identiques avec les résultats obtenus dans l'analyse des pluies annuelles et mensuelles. En effet, la station d'Aval Elhri présente des moyennes importantes par rapport à celles de la station de Chacha N'mallah. La question qui s'oppose c'est comment une station qui montre un moyenne pluviométrique important (cas de la station d'aval Elhri dont la moyenne est 606 mm) possède un nombre des jours pluvieux inférieur, et une autre station avec une moyenne inférieure (cas de la station Chacha N'mallah dont la moyenne est 490 mm) possède un nombre de jours pluvieux important sur la même chronique (1976-2016) ? Pour répondre à cette question on va faire une étude de l'intensité des pluies journalières.

3.2. Etude de l'intensité des pluies journalières

Le but de cette analyse est de classifier les jours pluvieux de la chronique selon l'intensité des pluies enregistrées le telle jour. En effet, pas toutes les pluies qui tombent sur un bassin versant sont capable de provoquer des écoulements, il faut qu'elles dépassent un certain seuil, surtout dans un contexte climatique semi-aride comme celui du bassin versant de l'oued Srou.

Pour expliquer d'avantage cette situation on a choisi les seuils de 1,2,5 et 10 mm, et on a calculer à chaque fois le nombre des jours qui répondent à cette critère (la pluviométrie enregistrée durant le jour dépasse ou égale le seuil). Puis, on va calculer l'intensité pluviométrique pour les deux stations. L'intensité pluviométrique est donnée par la relation suivante :

| | |
|-----------------|---|
| I= P/NJP | Avec - I : intensité pluviométrique en mm/jour - P : pluie moyenne annuelle en mm - NJP : nombre de jours pluvieux |
|-----------------|---|

Le tableau (5-8) présente les résultats du calcul de l'intensité pluviométrique des nombres des jours pluvieux selon les différents seuils dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah.

Tableau 5-8:Variation de la moyenne des jours pluvieux et de l'intensité pluviométrique en fonction de la seuil pluviométriques

| | | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
|--|----------------|------------|-----------------|
| Nombre de jours pluvieux | P>0 | 60 | 75 |
| | P>1 | 54 | 51 |
| | P>2 | 46 | 43 |
| | P>5 | 33 | 28 |
| | P>10 | 21 | 16 |
| Intensité pluviométrique en mm/jour | P>0 | 9,89 | 6,97 |
| | P>1 | 10,97 | 9,35 |
| | P>2 | 12,56 | 10,73 |
| | P>5 | 16,01 | 14,39 |
| | P>10 | 20,96 | 19,50 |

D'une façon générale, en augmentant les seuils, le nombre des jours pluvieux diminues. Par exemple pour la station d'aval Elhri le moyenne des jours pluvieux passe de 54 jours/an pour

un seuil de 1 mm à seulement 21 jours/an pour un seuil de 10 mm. Ce qui est un écart de 32 jours entre les deux seuils.

L’intensité pluviométrique est importante dans la station d’Aval d’Elhri par rapport à celle de la station de Chacha N’mallah, pour les différents seuils. Ceci montre que malgré le nombre important des jours pluvieux enregistrés dans la station de Chacha N’mallah, la moyenne pluviométrique annuelle reste faible par rapport à celui de la station d’Aval Elhri.

3.3. Quantification des pluies journalières dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

On a classifié les jours pluvieux selon la quantité des pluies tombées sur le jour. Les graphes de la figure (5-14) présentent les résultats obtenus.

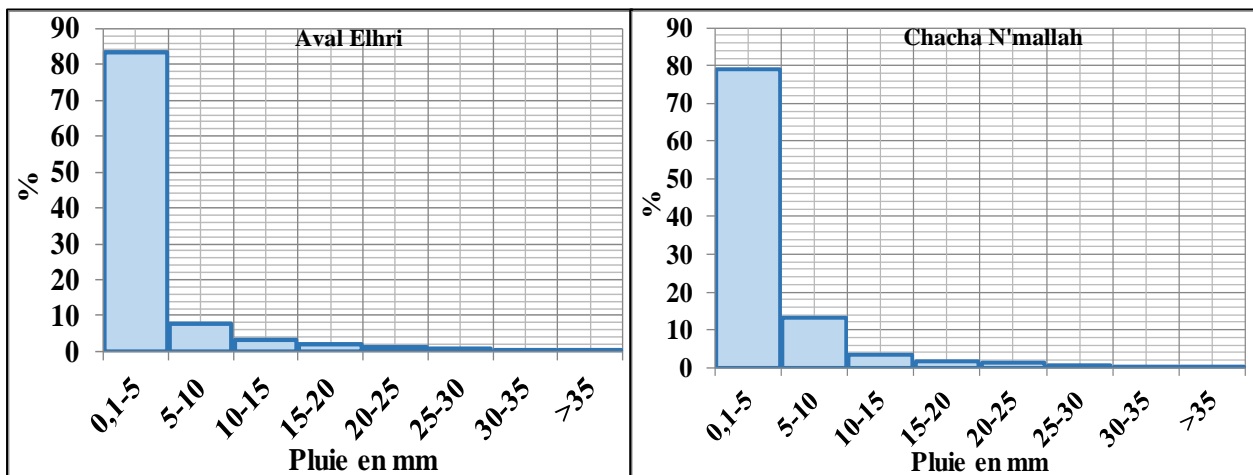


Figure 5-14:Fréquence des pluies journalières par classe dans les stations du bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

La classe 0.1-5 mm a une fréquence qui dépasse les 75 % dans les deux stations du bassin versant de l’oued de Srou. Ce qui signifie que ce bassin reçoit en générale des pluies journalières qui ne dépassent pas les 5 mm par jours. Alors que les fortes pluies ne sont que des phénomènes rares et exceptionnelles.

3.4. Nombre des jours pluvieux par mois

A ce niveau on va essayer d’extraire la répartition des jours pluvieux selon les mois de l’année sur la chronique 1976-2016 dans les deux stations du bassin versant de l’oued Srou. Dans le but de déterminer les mois qui contiennent le plus grand nombre des jours pluvieux. Les graphes (Figure 5-15) montrent la variation de la moyenne des jours pluvieux par mois de l’année durant la chronique 1976-2016.

Les résultats obtenus montrent que les mois de janvier à avril présentent un nombre de jours pluvieux importants, avec un max pendant le mois de février pour les deux stations du bassin. Les mois de juin à septembre ont un nombre de jours pluvieux faible avec un minimum pendant le mois de juillet dans les deux stations. Les mois de mai et d’octobre ont un nombre de jours pluvieux moyennes, ce qui peut être expliquer par les phénomènes orageux observés produites durant les deux mois.

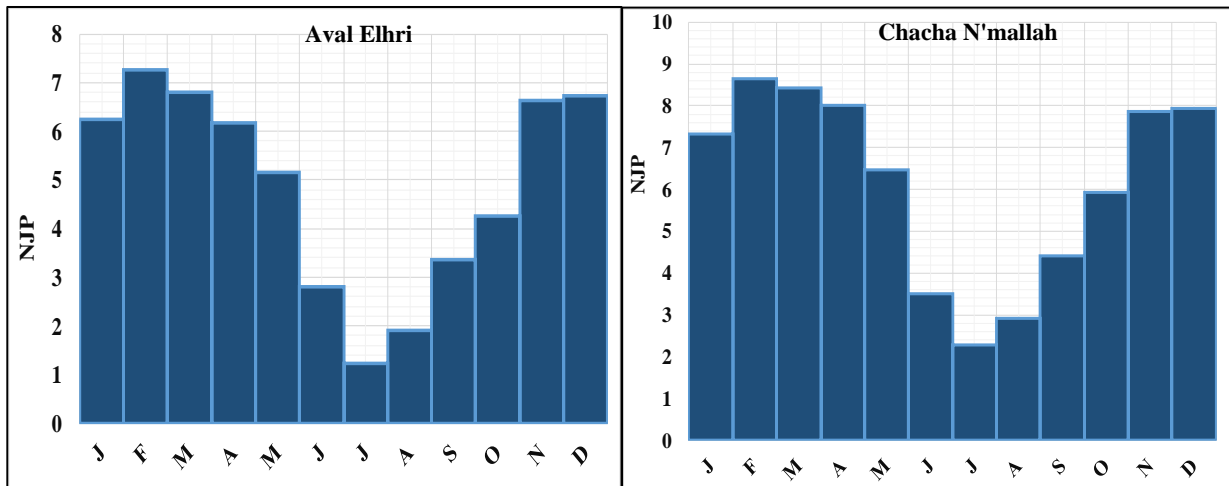


Figure 5-15: Moyenne des jours pluvieux par mois dans les stations du bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

Ces résultats confirment celles obtenus lors de l’analyse des pluies mensuelles. En effet, les mois de la saison humide contiennent un nombre de jours importants par rapports au mois de la saison sèche. Donc le recharge des cours sera réaliser pendant les mois humides avec des pluies journalières intenses.

La présente analyse montre que la grande partie des pluies journalière qui tombe sur le bassin versant de l’oued de Srou sont inférieure à 5 mm. Ces 5 mm dans un climat semi-aride sont très fragiles par l’ETP, ce qui pose encore la question sur l’utilité de ces pluies (pluies efficaces). Vue cette observation les entrés pluviométriques seules ne sont pas capable d’alimenter l’écoulement. Donc l’explication demeure dans les précipitations nivales qui tombent sur les sommets et lignes de crêtes du bassin versant. Il neige 20 jours par an et la neige tient pendant une quarantaine de jours en moyenne, de façon discontinue. Les chutes de neige sont enregistrées au milieu de l’automne, à la fin de l’hiver et se prolongent généralement jusqu’au printemps. La couche est peu épaisse. Notant que ces précipitations ne sont pas quantifiables dans la région du fait de l’absence des stations de mesures.

Axe 12 : Température et Evapotranspiration dans le bassin versant e l’oued de Srou (1986-2016).

La température influence l’écoulement à travers l’ETP qui va réellement dessiner les caractéristiques saisonnières hydrologiques. Afin de déterminer le régime de température du bassin versant de l’oued de Srou nous avons mené une analyse à l’échelle annuelle et à l’échelle mensuelle pour les deux stations de Taghat et d’Ahmed Elhansali. La démarche adoptée comprend une analyse des données de la chronique (1986 - 2016).

À la suite des résultats du questionnaire réalisé dans le bassin versant de l’oued de Srou, la température du bassin a augmenté dans les dernières années selon les observations des habitants, 90,6 % des avis confirmes. L’épisode la plus chaude ressentie dans la région est la période des années 2000. Ces confirmations ne sortent pas du contexte nationale et internationale du changement climatique et le réchauffement climatique.

1. Température dans le bassin versant de l’oued de Srou (1986-2016)

Le but donc de cette étude est d’identifier les tendances thermiques générales du bassin et de détecter les variations du régime dans le temps.

1.1. Variation inter annuelle de la température

Les valeurs de la température annuelle moyenne dans le bassin de l’oued de Srou connaissent une légère variabilité à l’échelle temporelle avec une augmentation de l’amont (station de Taghat) vers l’aval du bassin (station d’Ahmed Elhansali) (Figure 5-16).

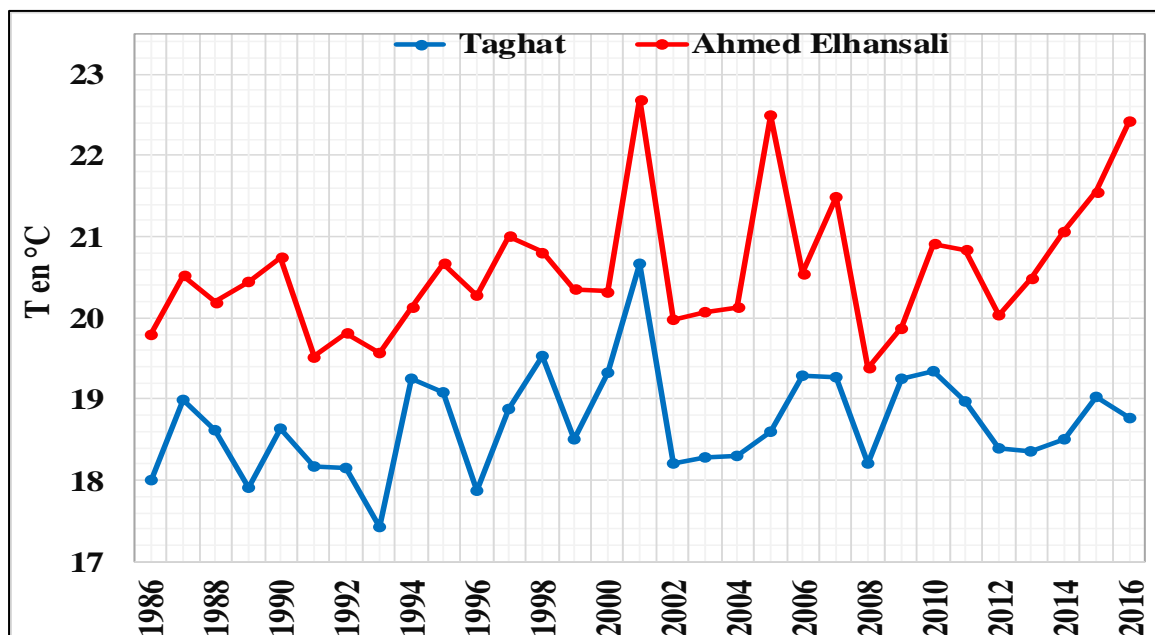


Figure 5-16: Variation de la température moyenne annuelle et tendance dans les stations de Taghat et d’Ahmed Elhansali (1986-2016)

Les moyennes de la température dans les stations de Taghat et d’Ahmed Elhansali sont respectivement 18.2 °C et 20.04 ° C. Le coefficient de variation permet d’exprimer la variabilité inter annuelle, dont les valeurs varient entre 3.5% à Taghat et 4.1 % à Ahmed Elhansali (Tableau 5-9). Ces valeurs sont faibles et témoignent une faible variabilité, qui est moins importante que celle des précipitations. Ceci est liée au fort ensoleillement direct sur le territoire marocain, qui maintient une certaine stabilité de la température d’une année à l’autre.

Tableau 5-9 : Variabilité de la température moyenne annuelle dans les stations Taghat et d’Ahmed Elhansali (1986-2016)

| Stations | T° moyenne en °C | Ecart-type | Coefficient de variation |
|--------------|------------------|------------|--------------------------|
| Taghat | 18,20 | 0,64 | 3,50 |
| Dchar Eloued | 20,40 | 0,83 | 4,09 |

L’année 2001 est la plus chaude dans le bassin versant de l’oued de Srou, les températures moyennes enregistrées pendant cette année dans les stations de Taghat et d’Ahmed Elhansali sont respectivement : 20.2 °C et 22.2°C. Alors que les années 1993 à Taghat (16.9 °C) et 2008 à Ahmed Elhansali (18.9 °C) sont les plus froides de la chronique d’étude.

Il est donc, intéressant d’appliquer la méthode de Cusum à cette chronique pour déterminer la tendance de la température dans la région. Le Cusum de la température est différent dans l’interprétation de celui de la pluviométrie, une simple réflexion mathématique clarifie les choses. Les phases d’augmentation dans la courbe indiquent que les valeurs de la température augmentent, donc on est dans la période chaude. Alors que les phases de diminution indiquent des périodes froide (Serbout, 2001 et El Ghachi, 2007). Le traitement de la chronique 1986-2016 des données de la température des stations Taghat et Ahmed Elhansali par la méthode Cusum a donné les résultats suivants (Figure 5-17) :

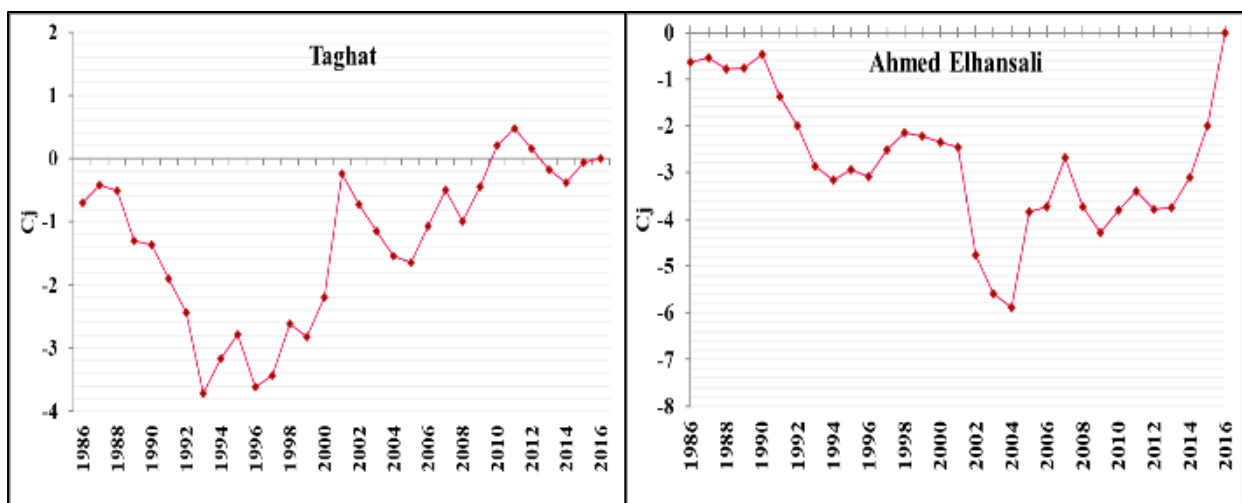


Figure 5-17 : Cusum de la température des stations de Taghat et d’Ahmed Elhansali (1986-2016)

L'analyse des courbes de Cusum pour les deux stations thermométriques montre que la période 1986-2016 est hétérogène, composée des phases de diminution et d'autre d'augmentation (Tableau 5-10) .

Au niveau de la station Taghat, cinq périodes résultent de découpage, trois froides avec indice T_i/T inférieur à 1 : 1986-1993 ; 2002-2005 ; 2012-2016, et deux périodes chaudes avec un indice T_i/T supérieur à 1 : 1994-2001 ; 2006-2011

Pour la station Ahmed Elhansali, six périodes homogènes ont été obtenues par le découpage Cusum. Deux périodes froides : 1986-1994 ; 2002-2004 ; 2008-2009 avec un indice T_i/T inférieur à 1 et deux périodes chaudes : 1995-2001 ; 2005-2007 ; 2010-2016 avec un indice T_i/T supérieur à 1.

Tableau 5-10 : découpage de la chronique pour la station Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)

| Période | Moyenne | Moyenne de la période | Ecart type | T_i/T | Diagnostic |
|-----------|---------|-----------------------|------------|---------|-----------------------|
| 1986-1993 | 18,2 | 17,74 | 0,49 | 0,97 | Série homogène froide |
| 1994-2001 | | 18,64 | 0,81 | 1,02 | Série homogène chaude |
| 2002-2005 | | 17,85 | 0,17 | 0,98 | Série homogène froide |
| 2006-2011 | | 18,56 | 0,44 | 1,02 | Série homogène chaude |
| 2012-2016 | | 17,92 | 0,07 | 0,98 | Série homogène froide |
| 1986-1994 | 19,9 | 19,59 | 0,43 | 0,98 | Série homogène froide |
| 1995-2001 | | 20,04 | 0,29 | 1,01 | Série homogène chaude |
| 2002-2004 | | 18,79 | 0,87 | 0,97 | Série homogène froide |
| 2005-2007 | | 21,01 | 0,96 | 1,02 | Série homogène chaude |
| 2008-2009 | | 19,13 | 0,35 | 0,96 | Série homogène froide |
| 2010-2016 | | 20,17 | 0,41 | 1,01 | Série homogène chaude |

Les périodes 1994-2001 ; 2005-2007 sont les plus chaude respectivement pour la station de Taghat et la station Ahmed Elhansali.

En résumé de l'aperçu thermique annuel du bassin de l'oued de Srou, nous avons cherché dans la bibliographie les anciennes études réalisées sur la région afin de déterminer l'évolution thermique dans le bassin. Il semble que ces résultats confirment une montée des températures depuis le début des années 80 (SERBOUT, 2001 et ELBOUQADIOU, 2004).

1.2. Régime et variabilité mensuelle des températures dans le bassin de Srou (1986-2016)

L'objectif de l'étude mensuelle est de montrer le contraste saisonnier de la température au niveau du bassin versant de l'oued de Srou. La variabilité va être étudié à deux niveaux ; une

analyse statistique des moyennes mensuelles de la température des deux stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali, et une étude du coefficient mensuel de la température (CMT) dans le but de déterminer les saisons sèches et humides (Tableau 5-11).

La température mensuelle moyenne présente une forte variabilité. En effet, les plus fortes valeurs enregistrées pendant le mois de juillet (Taghat : 29°C et Ahmed Elhansali : 30,4°C). Les températures minimales sont observées dans les mois de janvier (9,7°C à Taghat et 11,2°C à Ahmed Elhansali).

Tableau 5-11: Température moyenne mensuelle dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)

| | | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Taghat | T en °C | 9,7 | 10,7 | 12,8 | 15,2 | 19,6 | 24,8 | 29,0 | 28,6 | 24,3 | 19,1 | 14,0 | 11,0 |
| | σ | 1,2 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 2,1 | 1,8 | 1,1 | 1,3 | 2,0 | 1,6 | 1,2 | 2,5 |
| Ahmed Elhansali | T en °C | 11,2 | 12,4 | 15,2 | 17,6 | 21,9 | 25,9 | 30,4 | 30,2 | 25,8 | 21,0 | 16,1 | 12,7 |
| | σ | 1,3 | 1,9 | 1,5 | 2,2 | 1,9 | 2,5 | 1,8 | 1,9 | 1,4 | 2,5 | 1,7 | 1,2 |

L'amplitude thermique, qui est la différence entre la température maximale du mois le plus chaude et la température minimale du mois le plus froide (LABORDE, 2000), montre que les valeurs de cette amplitude sont élevées dans les deux stations du bassin, il est de l'ordre de 19,2°C. ce qui est dû à l'effet du régime continental.

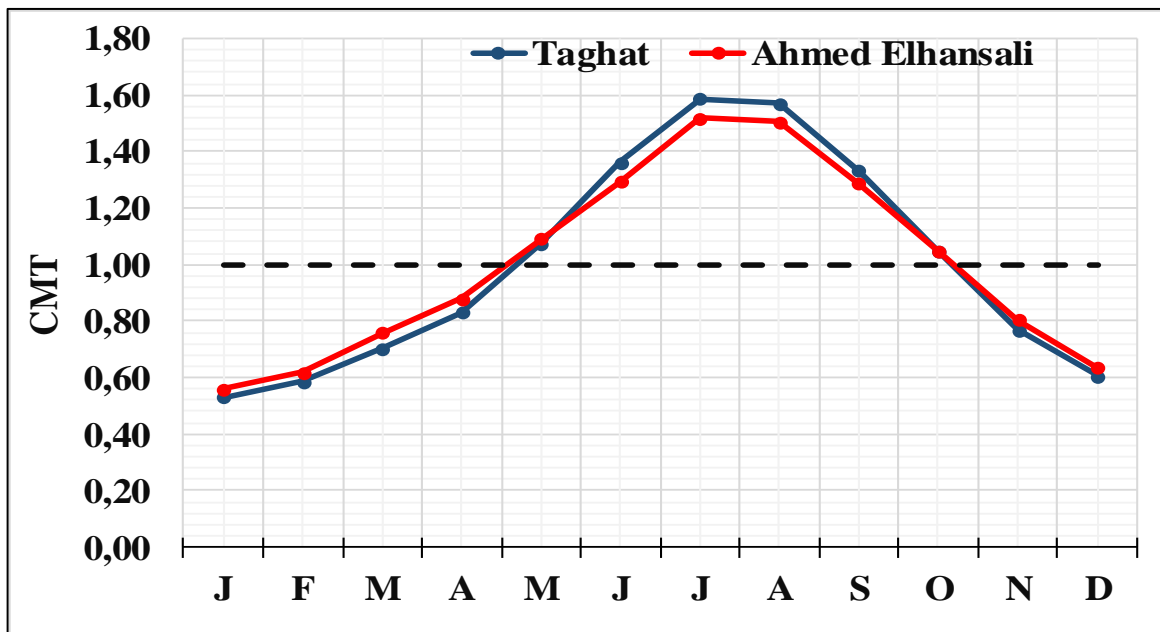


Figure 5-18: Coefficient mensuel de température des stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)

Les résultats du CMT présentés dans les graphes (Figure 5-18) montrent que les mois de l'année peuvent être répartis en deux groupes : des mois avec des valeurs inférieures à 1 représentent la saison froide, tandis que les valeurs supérieures à 1 représentent la saison chaude.

- La saison froide : elle commence au mois de novembre jusqu'au mois d'avril, les mois de janvier et de février sont les mois les plus froids dans le bassin versant de l'oued de Srou. Au cours de cette période et grâce à ses températures faibles la zone amont (zone des causses Moyen-Atlasiques) reçoit des quantités importantes des précipitations solides, qui assurent l'alimentation des cours d'eau du bassin.

- La saison chaude : elle débute en mai, elle connaît une augmentation importante de la température jusqu'au des valeurs maximales pendant les mois de juillet et d'août. Ce qui favorise les phénomènes d'évaporation et de transpiration, et par la suite une diminution intense dans les volumes d'eau écoulés dans la région.

2. ETP dans le bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016)

Le terme "évapotranspiration" (ETP) désigne les pertes d'eau d'un couvert végétal en fonction de la réserve d'eau du sol, le stade de développement de la végétation et l'ambiance atmosphérique (MJEJRA, 2015). L'évapotranspiration représente, donc, deux processus de transfert d'eau. Le premier est le transfert d'eau dans le continuum « sol-atmosphère » et le deuxième concerne le transfert d'eau dans le continuum « plante-atmosphère » (LECOEUR in MJEJRA, 2015). Elle exprime aussi, « les échanges de masse et d'énergie entre le système sol-eau-végétation et l'atmosphère » (HAMIMED ET AL., 2014).

2.1. Formules de calcul de l'ETP

Plusieurs méthodes ont été élaborées pour le calcul de l'ETP dans différentes régions du monde. Nous proposons ici, celles qui sont facilement accessibles et qui sont les plus adaptées à notre situation climatique.

• **Formule de Thornthwaite (1948)**

Le paramètre principal de cette méthode est d'origine thermique, Thornthwaite a démontré expérimentalement que l'ETP mensuelle est lié à la température moyenne mensuelle par la relation suivante :

| | |
|---|--|
| $ETP = 16 \times \left(10 \times \frac{T}{I}\right)^a \times K$ | <p>Avec</p> <ul style="list-style-type: none"> - ETP : Evapotranspiration mensuelle en mm - T : Température moyenne mensuelle en ° C - I : Indice thermique annuel qui est la somme des douze valeurs mensuelles. $I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \text{ et } i = (0.2T \text{ °C})^{1.514}$ <ul style="list-style-type: none"> - Coefficient constant qui dépend de I ($a = 0.016 \times I + 0.5$) |
|---|--|

La formule de THORNTHWAITE est très simple à appliquer, elle ne demande que la température moyenne du mois.

Mais elle présente un inconvénient majeur qui est celui des résultats sont très sous-estimés en zone aride et semi-aride à l'échelle mensuelle, comme c'est le cas du bassin versant de l'oued de Srou. Néanmoins à l'échelle annuelle les résultats sont plus cohérents (SERBOUT, 2001).

• **Formule de TURC (1962)**

TURC est basé dans la formulation de sa méthode sur trois paramètres importants ; la température moyenne mensuelle, la durée d'insolation et l'humidité relative. La formule est donnée par la relation suivante :

| | |
|--|--|
| $ETP = K \left(\frac{T}{T + 15} \right) (I_g + 50) \left(1 + \frac{0.5 - HR}{0.7} \right)$ <p>- Avec $I_g = I_g a \left(0.18 + 0.62 \times \frac{h}{H} \right)$</p> <p>NB : $\left(1 + \frac{0.5 - HR}{0.7} \right)$ uniquement pour le climat sec.</p> | <p>Avec</p> <ul style="list-style-type: none"> - ETP : Evapotranspiration mensuelle en mm - T : Température moyenne mensuelle en ° C. - Hr : humidité relative. - I_g : estimation du rayon solaire global à partir de la fraction d'insolation (h/H). - h : insolation mensuelle observée - H : insolation maximale possible du mois - I_{ga} : rayonnement moyen journalier pour un mois civil en cal/cm²/jour (latitude). |
|--|--|

Tableau 5-12: Coefficient de corrélation qui en fonction de la latitude du lieu

| Mois | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|----------------------|-----|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| Coefficient K | 0,9 | 0,87 | 1,03 | 1,08 | 1,18 | 1,18 | 1,2 | 1,14 | 1,03 | 0,98 | 0,89 | 0,88 |

*Monographie N°65 de la Météorologie Nationale, 1968

La formule de TURC paraît plus logique, car elle prend en considération les facteurs réels de l'évapotranspiration ; la température moyenne, la durée d'insolation et l'humidité relative. Le problème de cette méthode réside dans le manque des données de l'humidité relative et d'insolation dans le bassin versant de l'oued de Srou.

- **Modèle d'LOUDIN (2005)**

LUDOVIC OUDIN a testé plus de 27 modèles de l'ETP, en termes d'efficacité dans la simulation de l'écoulement sur un large échantillon de 308 bassins versants en France, Australie et l'Amérique du Nord. Il a essayé de déterminer quelle variable atmosphérique agit le plus sur le calcul de l'ETP, en même temps il a testé les résultats obtenus sur des modèles pluies-débits.

Sur la base de ses résultats, OUDIN a proposé un modèle de l'ETP facile et simple. Cette méthode est basée sur la température moyenne et la latitude de la région pour déterminer le rayonnement solaire.

2.2. Variation de l'ETP dans le bassin versant de l'oued de Srou

Toutes les méthodes qui ont été présentées nécessitent des données dont nous ne disposons pas. C'est la raison pour laquelle nous avons calculé l'ETP selon deux méthodes : Thornthwaite et Oudin et nous l'utiliserons pour la période 1986-2016.

- **Variabilité annuelle de l'ETP**

Les graphes (Figure 5-19) donnent l'ETP annuelle dans la station de Taghat au nord du bassin, avec une altitude qui dépasse le 1036 m, et la station d'Ahmed Elhansali au sud avec une altitude de 595m. Le calcul de l'ETP est réalisé par deux méthodes : celle de Thornthwaite et celle d'OUDIN.

Les valeurs de l'ETP données par la formule d'OUDIN sont plus élevées que celles de Thornthwaite. Cette différence est plus marquée au sud du bassin dans la station d'Ahmed Elhansali. Mais en général l'ETP annuelle évolue avec les deux méthodes de la même sens.

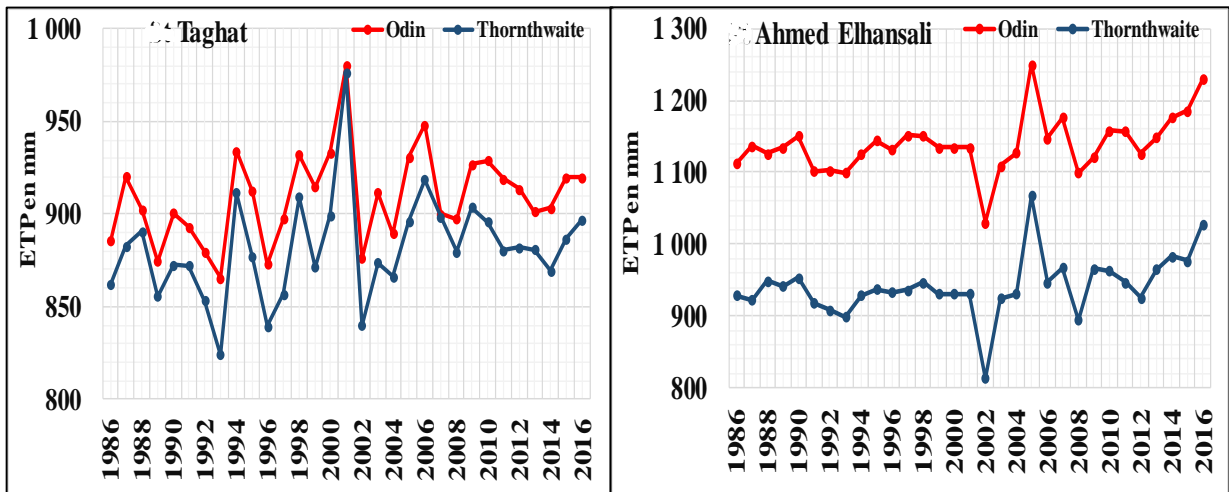


Figure 5-19: Variation annuelle de l'ETP dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)

Les moyennes de l'ETP annuelle sont plus importantes au sud du bassin (1139 mm) qu'au nord du bassin (909 mm), c'est une différence importante. D'une part les valeurs de l'ETP sont fortement liées à la variation de la température, ce qui est normale puisque celle-ci est le paramètre essentiel dans le calcul de l'ETP. D'autre part, la comparaison des valeurs de l'ETP au données pluviométriques annuelles montrent que la zone qui reçoit les faibles précipitations, connaît une forte évapotranspiration. Le cas de la station de d'Ahmed Elhansali, reçoit 539 mm/an alors que l'évapotranspiration potentielle est de 1139 mm/an. Il s'évapore 2.11 fois plus d'eau qu'il n'en tombe, ce qui provoque un déficit de 600 mm/an.

Notant que la méthode Thornthwaite donne des valeurs faibles de l'ETP que celles calculées par la méthode Oudin. Ce qui confirme la remarque citée auparavant sur la limite d'utilisation de la méthode Thornthwaite dans les climats arides et semi-arides

- **Variabilité mensuelle de l'ETP**

Comme dans le cas la variabilité des températures et précipitations mensuelles, les moyennes de l'ETP connaissent aussi une variabilité saisonnière qui suit dans son allure la saisonnalité des températures dans le bassin versant de l'oued de Srou (Figure 5-20). La variabilité entre les deux méthodes de calcul de l'ETP à l'échelle mensuelle est moins prononcée pendant les mois secs que les mois humides. Nous essayons de faire le découpage saisonnier de l'ETP ;

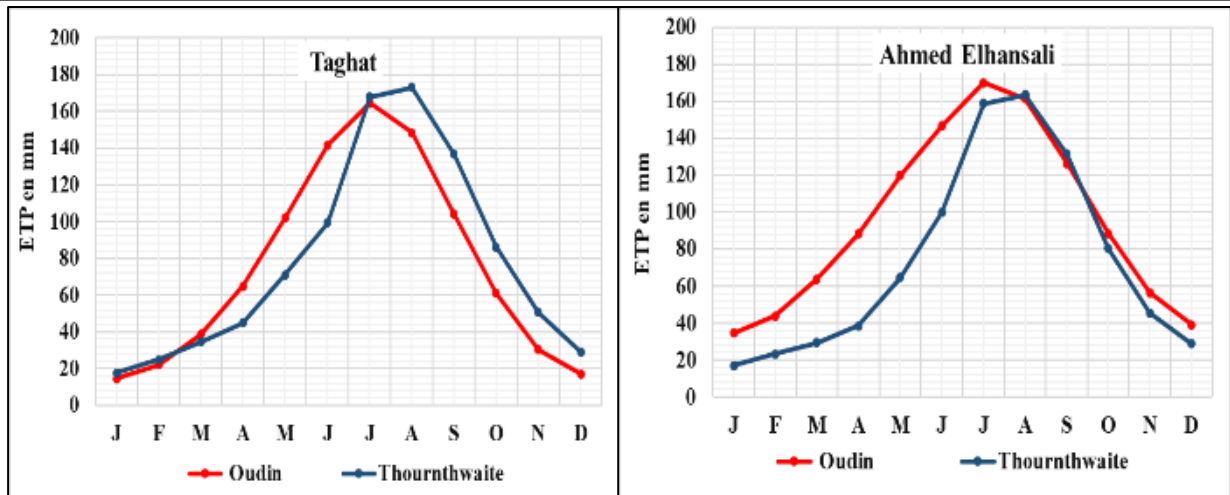


Figure 5-20: Variation mensuelle de l'ETP dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)

- La saison humide commence de novembre jusqu'au avril ; elle connaît une faible évapotranspiration (187 mm à Taghat et 325 mm à Ahmed Elhansali). Le mois de janvier est le mois de faible évapotranspiration de l'année.
- La saison sèche est caractérisée par une forte évapotranspiration (721 mm à Taghat et 813 mm à Ahmed Elhansali). Le mois de juillet connaît la plus forte évapotranspiration.

Axe 13 : Zoom sur le bilan hydrique du bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016)

Une approche simple du bilan hydrique permet de préciser l'organisation moyenne de l'année en termes de disponibilité en eau. Ce bilan procède par la comparaison mensuelle des précipitations et de l'ETP. Les calculs ont été faits pour l'ensemble du bassin versant de l'oued de Srou. En matière de donnée, la méthode demande :

- La pluviométrie moyenne mensuelle spatialisée de la période 1986-2016
- Les ETP moyennes mensuelles calculées par la méthode d'Oudin.

Le bilan hydrique à l'échelle annuelle est toujours négatif dans les bassins de l'oued de Srou. La moyenne pluviométrique annuelle est dessous la lame d'eau évaporer que ce soit dans le sous bassin versant de Chbouka ou dans le bassin versant de l'oued de Srou. Le bassin de Srou reçoit annuellement 537 mm avec une quantité évaporer de 1139 mm, soit un déficit de 561mm. Au niveau du bassin de Chbouka, la pluviométrie annuelle est de 580 mm alors que la quantité évaporer est de 909 mm, soit un déficit de 316 mm.

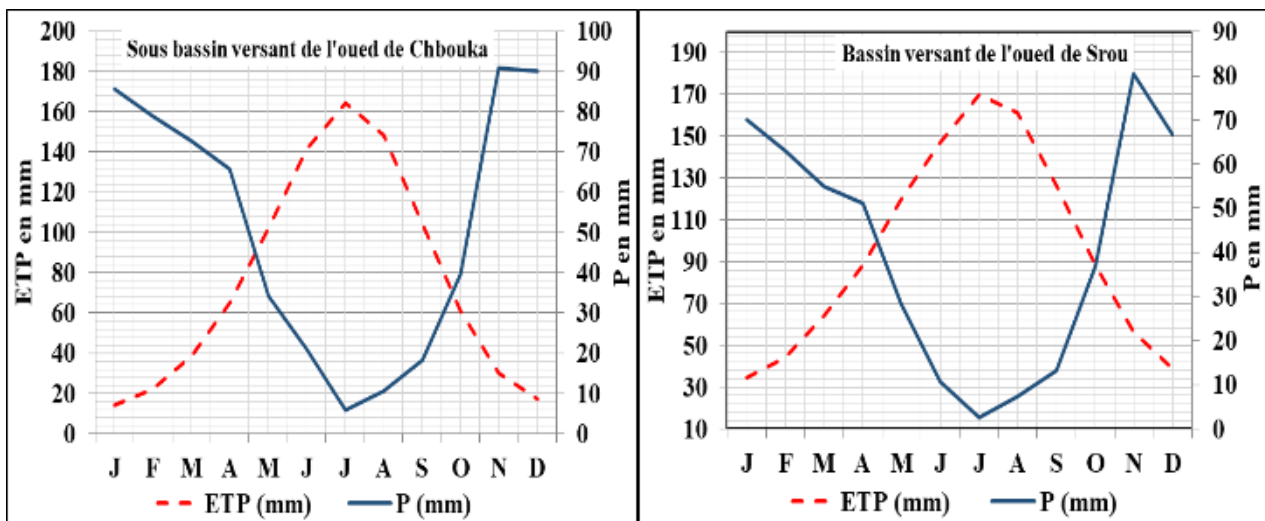


Figure 5-21 : Variation du bilan hydrique dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et le bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016)

Tableau 5-13 : Résultats du bilan hydrique dans le bassin versant de l'oued de Srou et le sous bassin versant de l'oued de Chbouka (1986-2016)

| Mois | Sous bassin versant de l'oued de Chbouka | | | Bassin versant de l'oued de Srou | | |
|------------------|--|--------|-------------|----------------------------------|--------|-------------|
| | ETP (mm) | P (mm) | P-ETP (mm) | ETP (mm) | P (mm) | P-ETP (mm) |
| J | 14 | 83 | 71 | 35 | 70 | 36 |
| F | 22 | 79 | 57 | 44 | 63 | 19 |
| M | 39 | 66 | 34 | 64 | 55 | -9 |
| A | 65 | 65 | 0 | 88 | 51 | -37 |
| M | 102 | 37 | -68 | 120 | 28 | -91 |
| J | 142 | 18 | -121 | 147 | 11 | -136 |
| J | 164 | 6 | -158 | 170 | 3 | -167 |
| A | 148 | 10 | -138 | 161 | 7 | -154 |
| S | 104 | 21 | -86 | 126 | 13 | -113 |
| O | 61 | 44 | -21 | 89 | 37 | -52 |
| N | 30 | 82 | 61 | 56 | 81 | 24 |
| D | 17 | 82 | 73 | 39 | 67 | 28 |
| Moyenne | 909 | 593 | -25 | 1139 | 485 | -54 |
| Surplus | | | 297 | | | 107 |
| Sur moins | | | -592 | | | -760 |

A l'échelle mensuelle on trouve deux périodes : une dite de surplus et l'autre de déficit.

- Période de surplus commence en novembre et se termine en avril. Durant cette phase les valeurs de l'ETP sont inférieures aux précipitations, ce qui donne un excédent de 297 mm dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et de 107 mm dans le bassin versant de l'oued de Srou. Ce qui favorise la recharge des nappes et l'alimentation des cours d'eau.

- Période de déficit : elle correspond à la phase sèche de l'année qui s'étend de mai à octobre. L'évapotranspiration est intense, le déficit dépasse 592 mm dans le sous bassin versant de l'oued Chbouka et 760 dans le bassin versant de l'oued de Srou. La perte maximale est enregistrée pendant le mois de juillet dans les deux bassins.

Conclusion du chapitre 5

La pluviométrie dans le bassin versant de l'oued de Srou est caractérisée par une forte variabilité dans le temps et dans l'espace. La zone appartient au domaine climatique semi-aride, dont les pluies annuelles sont comprises entre 490 mm et 699 mm sur la chronique 1976-2016. La spatialisation des pluies annuelles montre que la partie amont au nord-est reçoit des pluies importantes que la partie aval du sud-ouest. A l'échelle temporelle, les moyennes annuelles varient fortement d'une année à l'autre. Au niveau saisonnier, la zone présente deux saisons, une humide et une autre sèche. Les jours de pluies dans le bassin ne dépassent pas les 1/5 des jours de l'année avec une intensité inférieure à 5 mm/jours.

La zone du bassin versant de l'oued de Srou appartient au domaine continental avec un écart thermique qui dépasse les 19 °C entre les mois chauds et les mois froids. La tendance est vers l'augmentation dans les moyennes annuelles de la température. En effet, dans les dernières 30 ans, la température est augmentée au nord du bassin (station Taghat) avec plus de 0.6 °C et au sud (station d'Ahmed Elhansali) avec 1.1 °C. La saison chaude dure au moins 6 mois avec des valeurs de la température élevée. Pendant ces deux périodes, les conditions de l'évapotranspiration sont différentes. Elle est très importante dans le sud du bassin avec des valeurs élevées en mois de la saison chaude. Cette variabilité agit sur le disponible de la ressource en eau dans la région.

Chapitre 6 : Le fonctionnement hydrologique dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Introduction du chapitre 6

Axe 14 : Analyse des modalités des écoulements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Axe 15 : Mise au point sur la relation pluie débit dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Conclusion du chapitre 6

Introduction du chapitre 6

Le débit résulte de l'association des éléments de recharges (pluies et neiges), la nature du sol (physiographie, lithologie et géologie) et l'impact de la température traduit par l'évapotranspiration.

Comme nous l'avons vu précédemment, le bassin versant de l'oued de Srou est couvert d'un substratum quasiment imperméable (42 % de ces roches sont imperméables et 11 % des roches semi-perméable). Les précipitations sont mal réparties dans le temps et dans l'espace. Une forte variabilité est observée d'une année à l'autre et à l'intérieur de l'année (variabilité mensuelle). La zone de l'amont au nord-est est la plus humide, elle reçoit en plus de la neige des quantités pluviométriques importante. Les pertes s'accroissent en période des basses eaux. Ainsi l'évapotranspiration reste l'élément primordial de différenciation de l'écoulement au cours de l'année. L'équation climatique $P - ETP$ présente la lame d'eau disponible pour l'écoulement directement vers le cours d'eau, et plus rarement indirectement par les nappes souterraines (bassin quasiment imperméable) (Lambert, 1996). La région connaît un déficit hydrique important. Les données hydrométriques des deux stations du bassin versant de l'oued de Srou feront l'objet d'une étude analytique pour déterminer la quantité d'eau qui circule dans le cours d'eau puis de déterminer le comportement hydrologique à différentes échelles de temps. A cet effet nous élaborerons un bilan hydrologique pour quantifier les capacités de rétentions souterraines et pour déterminer la ressource en eau.

Axe 14 : Analyse des modalités des écoulements dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

Les écoulements sont le résultat de l’interaction de l’ensemble des conditions climatiques (apports et température) ainsi l’action de l’homme (prélèvements). Suit au questionnaire 80 % de la population riverain dit que le débit de l’oued de Srou été très important, et il arrive à des niveaux très dangereux. Il a provoqué la mort de plusieurs personnes surtout en périodes de crues.

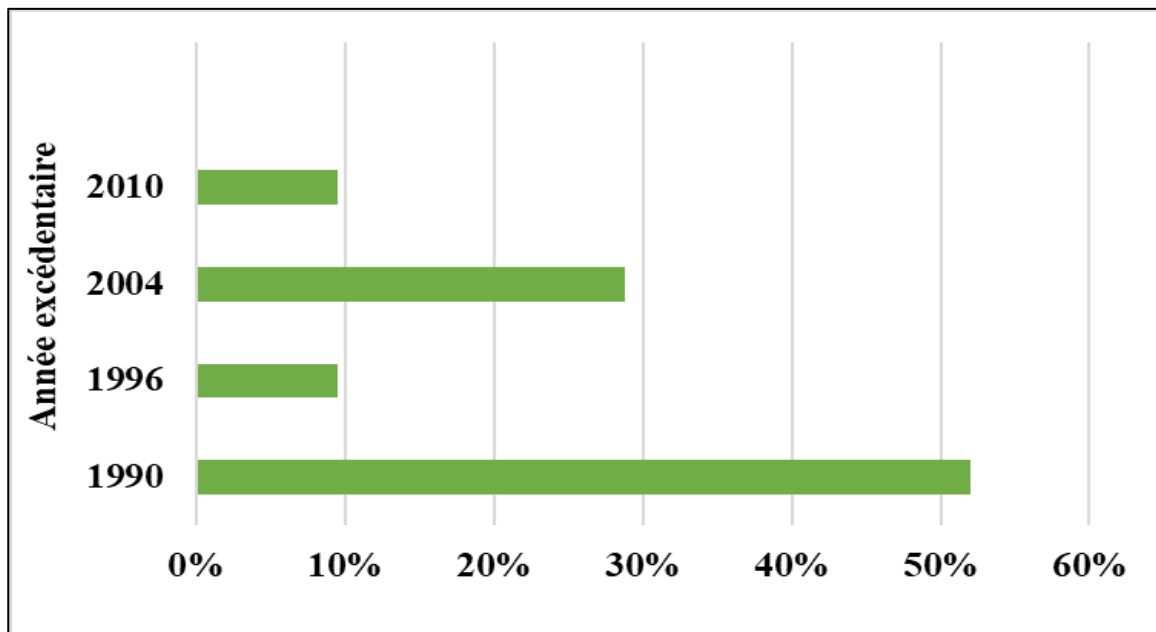


Figure 6-1 : Années excédentaires dans le bassin versant de l’oued de Srou

Les années de sécheresse les plus marquées dans la mémoire des habitants sont : les années 1990, 1996, 2004 et 2010. Le niveau des cours d’eau durant ces périodes devient très bas, mais sans un arrêt dans leurs écoulements. Les gens relient les sécheresses du bassin versant de l’oued de Srou au déficit pluviométrique. D’autres, surtout la population de l’aval du bassin, associent ces situations à l’impact des activités humains comme les carrières qui modifient en permanent le lit du cours d’eau et la déviation des sources en amont.

1. Variabilité annuelle des débits annuels dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

L’étude du comportement hydrologique à l’échelle annuelle va se basé sur l’analyse des débits moyennes, pour la période de (1976-2016), dont l’objectif principal est de détecter leurs variabilités spatio-temporelles ainsi leurs relations avec les pluies. À ce propos, les modules sont étudiés en deux niveaux. Le premier permet d’identifier les variations internes dans la chronique 1976-2016 pour la station Chacha N’mallah installée sur le cours d’eau principal de

l'oued de Srou à l'exutoire et qui n'explique pas tout le fonctionnement hydrologique du bassin. Le deuxième niveau concerne la même période 1976-2016 pour la station d'Aval Elhri installée sur l'oued de Chbouka, considéré comme l'affluent principal de l'oued de Srou. Le but ici est de déterminer la variabilité des modules et de cerner les différences intérieures dans le bassin versant de l'oued de Srou (Figure 6-2).

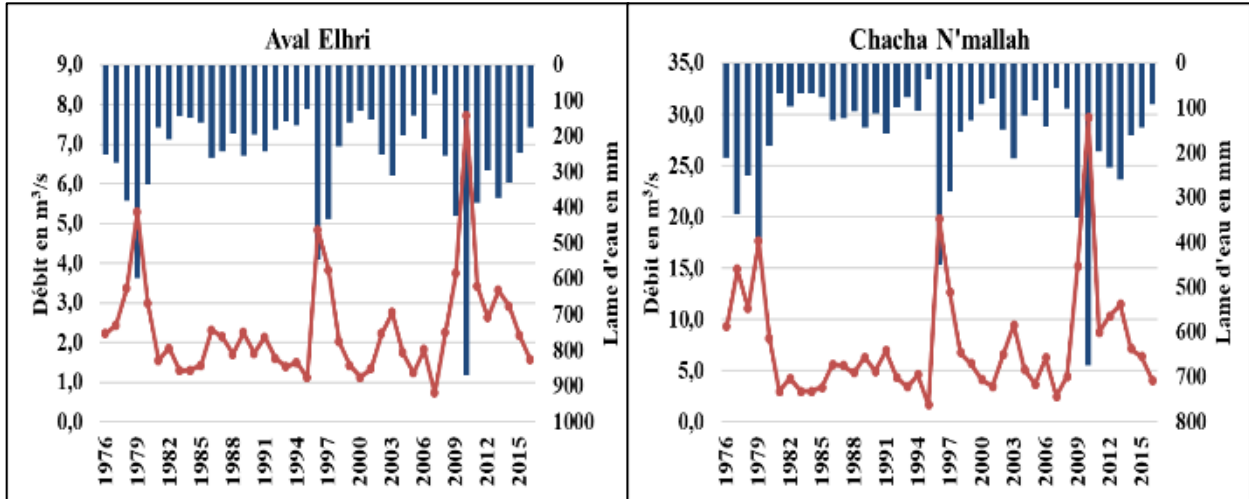


Figure 6-2 : Variabilité des débits annuels et des lames d'eau écoulées dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah Période 1976-2016

Les débits moyens annuels de l'oued de Srou enregistrés au niveau de la station de Chacha N'mallah pendant la chronique du 1976-2016, montrent des variations d'une année à l'autre. Cela est lié étroitement à la quantité et la nature des précipitations. Le débit moyen annuel a atteint une valeur maximale de l'ordre de $29,7 \text{ m}^3/\text{s}$ en 2010. Alors que le débit moyen minimal enregistré durant cette période est de l'ordre de $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ (1995). Tandis ce que le débit moyen de la chronique est de l'ordre de $7.7 \text{ m}^3/\text{s}$

Dans le sous bassin de l'oued de Chbouka, les débits sont marqués par une forte variabilité pour les 41 ans étudiés. La moyenne de la période d'étude est de $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$ tandis que le débit maximum est de l'ordre de $7.7 \text{ m}^3/\text{s}$ et débit minimum est de $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

Cette irrégularité des débits annuels montre clairement que les modalités de circulation hydrologique à l'échelle du bassin versant de l'oued de Srou dépendent essentiellement des modalités d'alimentations et les mécanismes de circulations.

1.1. Quantification de l'irrégularité des écoulements

Les débits annuels de l'oued Srou et son affluent oued Chbouka varient énormément d'une année à l'autre. Cette variabilité est bien illustrée par les débits moyennes annuels des années extrêmes (Tableau 6-1).

Tableau 6-1 : Mesure de l'irrégularité inter annuelle des débits des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

| Station | σ | R | Cv | Nombre des années | | Valeur à la moyenne |
|-----------------|----------|------|------|-------------------|--------|---------------------|
| | | | | humides | sèches | |
| Aval Elhri | 1,3 | 10,7 | 56,0 | 13 | 27 | 1,0 |
| Chacha N'mallah | 5,5 | 18,2 | 73,2 | 13 | 28 | 0,0 |

Pour les deux stations l’année 2010 est la plus abondante, l’année la plus sèche est variable ; c’est en 1995 à Chacha N’mallah et en 2007 en Aval d’Elhri. Ces deux années correspondent à des périodes de sécheresses exceptionnelles observées sur l’ensemble du pays.

Le mesure de l’irrégularités interannuelles de l’écoulement par des paramètres statistiques de quantifications tels que le coefficient d'hydraulicité (C.H) qui a montré que plus de 65% des années hydrologiques sont déficitaires au niveau des deux stations du bassin versant (Figure 6-3).

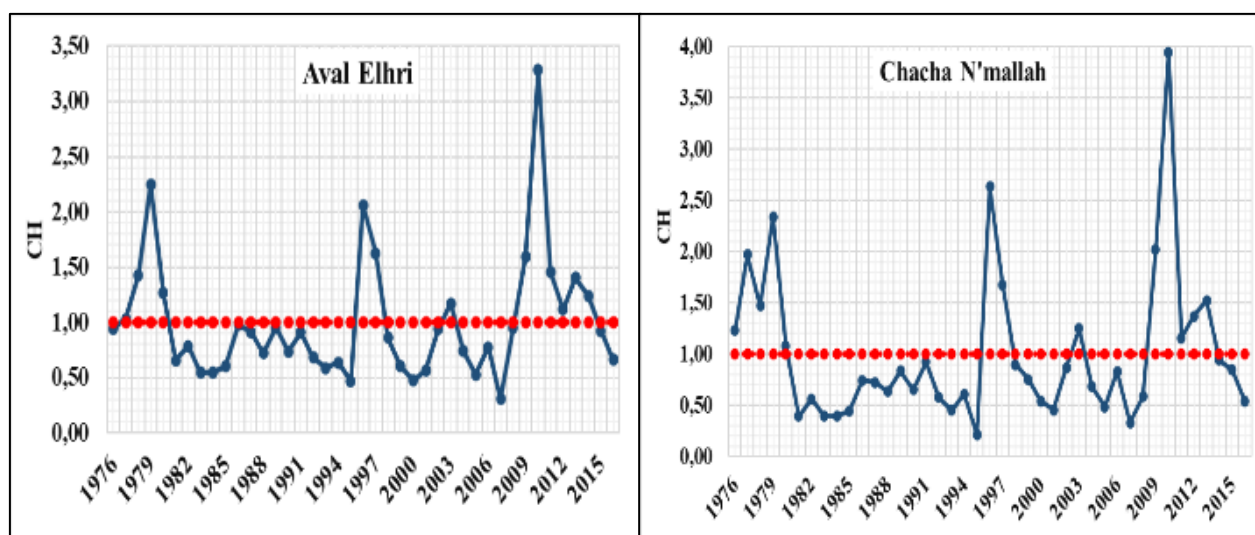


Figure 6-3 : Variabilité des coefficients d'hydraulicité dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

Les valeurs du coefficient de variation (Cv) sont variables. Le bassin d’Aval Elhri présente la plus faible valeur (56 %) et celui Chacha N’mallah possède la plus forte valeur (73,2 %). Le coefficient d’immodération qui est défini comme étant le rapport des modules extrêmes ($R=QM/Qm$), il vient d’exprimer l’irrégularité interannuelle des modules au niveau des stations. En Aval Elhri le coefficient d’immodération est faible, il est de l’ordre de 10,7, Cette valeur confirme l’impact des formations perméables (65 % de la superficie) sur les écoulements. Cependant, au niveau de la station du Chacha N'mallah il est très important (18,2), reflétant ainsi des irrégularités importantes dans les écoulements annuels.

Tableau 6-2: Résultats de l'analyse de la variabilité annuelles des modules des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah

| Station | Aval Elhri | | | Chacha N'mallah | | |
|---|------------|-------|-------|-----------------|-------|-------|
| Superficie en km ² | 331 | | | 1374 | | |
| Moyenne | Min | Moy | Max | Min | Moy | Max |
| Débit en m ³ /s | 0,7 | 2,4 | 7,7 | 1,6 | 7,7 | 29,7 |
| Lame d'eau en mm | 81,6 | 266,3 | 871,1 | 37,0 | 173,7 | 673,5 |
| Débit spécifique en l/s/Km ² | 2,6 | 8,6 | 28,0 | 1,2 | 5,6 | 21,7 |

On fait appel à l’indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d’ordre 2 pour mettre en évidence les tendances sèches et humides.

- **Analyse de l’évolution des débits annuels par l’indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d’ordre 2.**

La représentation graphique de la méthode du Filtre passe bas d’ordre 2 de HANNING appliquées aux séries hydrologiques permettre d’illustrer l’évolution des écoulements dans le bassin versant de l’oued de Srou à la station de Chacha N’mallah et dans le sous bassin de l’oued de Chbouka à la station d’Aval Elhri au cours de la période d’étude de 41 ans (Figure 6-4).

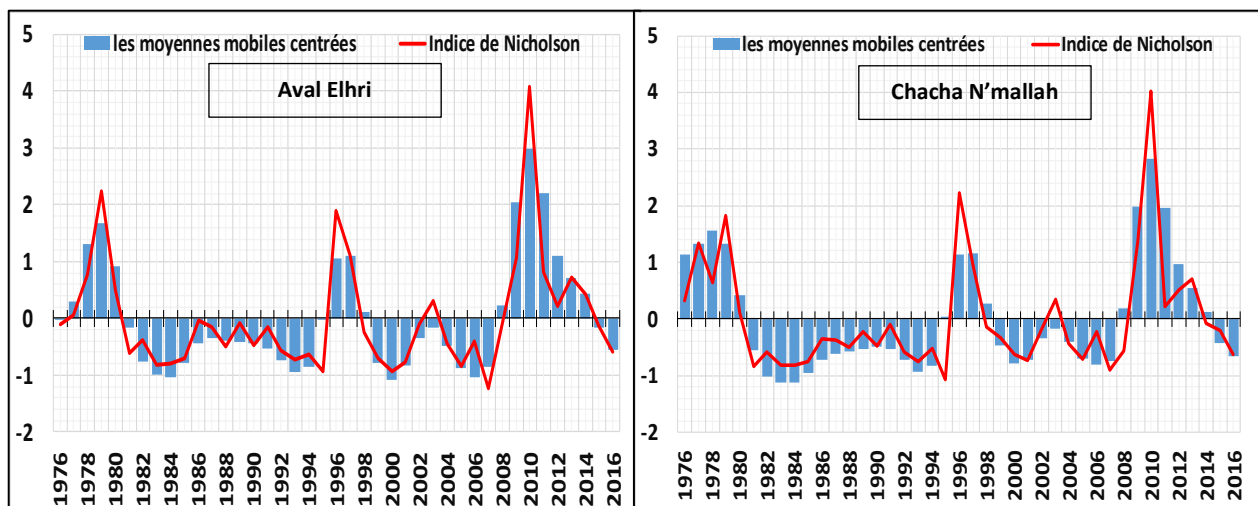


Figure 6-4 : Application l’indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d’ordre 2 aux débits annuels des stations d’Aval Elhri et de Chacha N’mallah

Les graphiques montrent respectivement une alternance des longues périodes déficitaires et des courtes périodes excédentaires. De 1980 à 2009 s’installe une longue période sèche sur le bassin versant de l’oued de Srou aux stations de Chacha N’mallah et d’Aval Elhri, cassée par

une courte période humide de 1996 à 1998. L’année 2010 correspond à l’entrée à la plus longue période excédentaire de la série qui a duré plus de 5 ans (GHADBANE ET AL, 2021).

1.2. Etude fréquentielle des écoulements

L’étude fréquentielle a pour but de rechercher le meilleur ajustement pour des relations connues appelées lois statistiques. Son objectif est d’assigner à une valeur de débit, une probabilité d’occurrence qu’on pourra traduire en fréquence ou un temps de retour (DUBREUIL, 1974). Elle s’appuie sur la définition d’une relation statistique entre les débits classés et la fréquence constatée (ou fréquence expérimentale). Les modules annuels s’ajustent bien à la loi Log-normal pour les deux stations d’Aval Elhri et Chacha N’mallah.

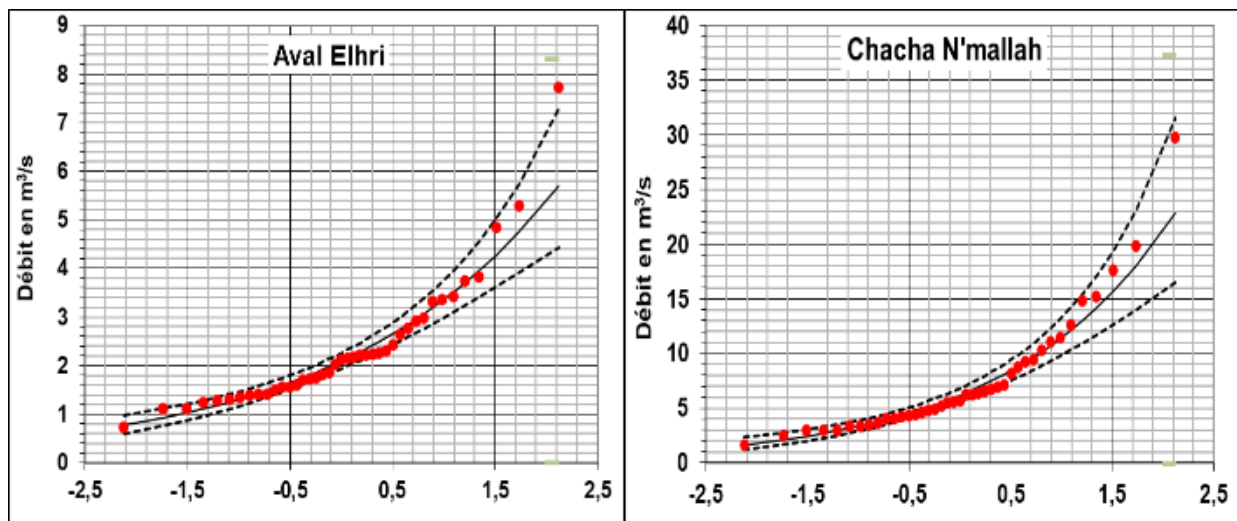


Figure 6-5: Ajustement des modules annuels des stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah à la loi Log-normale (1976-2016)

L’étude fréquentielle des modules annuels nous offre la possibilité d’estimer la disponibilité en eau pour les différentes périodes de retours. Selon DUBREUIL (1974) pour qu’une estimation reste crédible il faut que la période de retour ne soit pas supérieure au triple de la longueur de l’échantillon. Nous avons calculé les débits écoulés fréquentiels pour une durée de récurrence de 2, 5, 10 et 20 ans en années sèches et humides (Tableau 6-3).

Tableau 6-3: Module annuel fréquentiel dans les stations du bassin versant de l’oued de Srou pour la période (1976-2016)

| Fréquence | Vers le sec | | | | Ver l'humide | | |
|-------------------------------------|-------------|------|------|------|--------------|-------|------|
| | 1/20 | 1/10 | 1/5 | 1/2 | 1/5 | 1/10 | 1/20 |
| Période de retour en année | 20 | 10 | 5 | 2 | 5 | 10 | 20 |
| Aval Elhri (m ³ /s) | 0,96 | 1,14 | 1,40 | 2,09 | 3,11 | 3,82 | 4,54 |
| Chacha N'mallah (m ³ /s) | 2,25 | 2,81 | 3,68 | 6,18 | 10,37 | 13,59 | 17 |

- Pendant la période humide : les débits sont importants dans les deux stations. On note un accroissement rapide des écoulements avec l'augmentation des périodes de retours.

Pour la période de 5 ans les débits sont dépassés 8 fois en Aval d'Elhri (2013, 1978, 2011, 2009 1997, 1996, 1997 et 2010) et à Chacha N'mallah (1978, 2013, 1997, 1977, 2009, 1979, 1996 et 2010).

Pour la période de retour de 10 ans les débits sont dépassés que 4 fois en Aval d'Elhri (1997, 1996, 1979 et 2010) et 5 fois dans la station de Chacha N'mallah (1977, 2009, 1979, 1996 et 2010).

La valeur la plus élevée de la chronique observée dans le bassin versant de l'oued de Srou ($29,7 \text{ m}^3/\text{s}$) à une durée de retours de 150 ans, alors que celle enregistrée dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka à une période de retour de 400 ans.

- La période sèche : les écoulements décroissent en augmentant la période de retour.

Pour la période de 5 ans les débits sont dépassés 10 fois en Aval d'Elhri et 8 fois dans Chacha N'mallah. Pour la période de 10 ans les débits dépassés 3 fois en Aval d'Elhri et 2 fois au niveau de Chacha N'mallah.

La durée de retour de la valeur la plus faible observée dans les deux stations du bassin versant est 50 ans.

2. Régime d'écoulement du bassin versant de l'oued Srou

Le but de la présente étude est de déterminer le régime de l'oued de Srou et de son principale affluent l'oued de Chbouka. L'étude de la variabilité mensuelle des débits est basée d'une part sur l'analyse des coefficients mensuel de débit (CMD : module du mois sur le module annuel de la chronique 1976-2016), et d'autre part sur le Cv (coefficient de variation). Cette étude permettra la mesure de la variabilité des écoulements entre les mois à l'intérieur de l'année.

Comme tous les fleuves du Moyen-Atlas (SERBOUT, 2001 ; NEJARI, 2002 ; QADEM, 2014), l'oued de Srou et son affluent l'oued de Chbouka se caractérisent par deux saisons ; une phase des hautes eaux hivernales et une phase des basses eaux estivales. Les valeurs du CMD qui sont supérieures à 1 correspondent à la phase des hautes eaux, et les valeurs inférieures à 1 correspondent la période des basses eaux (Figure 6-6).

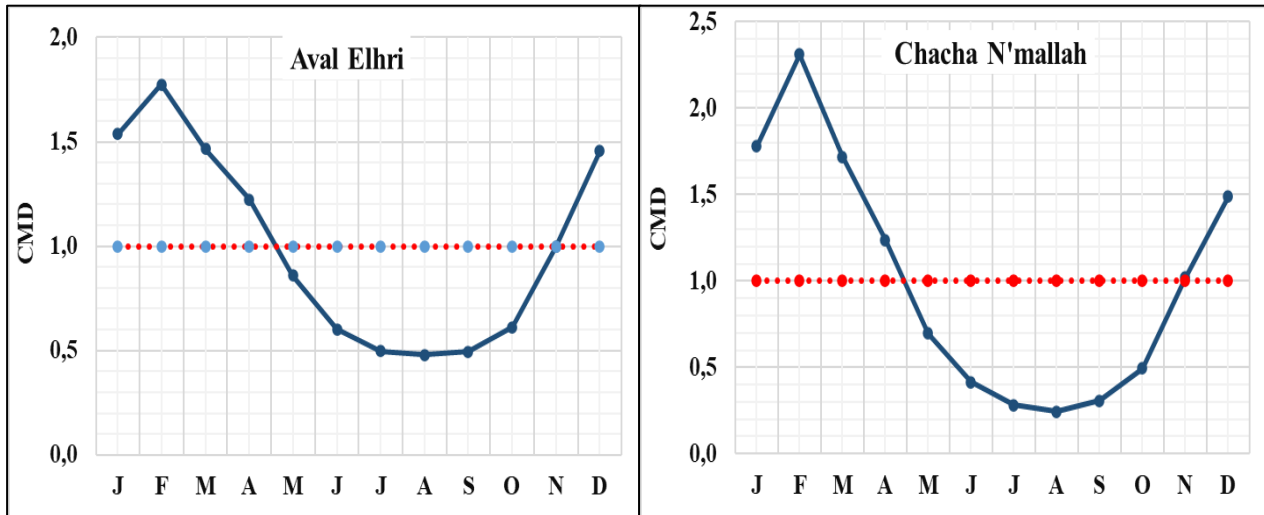


Figure 6-6: Variation du CMD dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

- La saison des hautes eaux coïncide avec la saison pluvieuse de l'année, qui commence en novembre et se termine en avril (6 mois). Le maximum est observé en mois de février dans les deux stations du bassin versant. Au cours de cette période le moyen pluviométrique enregistré est important dans les deux stations d'aval Elhri (81 mm) et de Chacha N'mallah (68 mm). En générale la courbe des débits suit celles des précipitations durant cette période, ce qui prouve que toutes les conditions (précipitations importants, évapotranspiration faible et sol saturé...) sont réunies pour favoriser le ruissellement direct, et par la suite la création des forts débits surtout au niveau de la station de Chacha N'mallah.

- La saison des basses eaux dure de mai à octobre, les apports pluviométriques au cours de cette période sont relativement faibles (20 mm dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et 16 mm dans le bassin versant de l'oued de Srou). Cependant et malgré l'évapotranspiration intense, les débits minimaux de Chbouka et du Srou se n'annulent jamais et restent supérieur à 1.2 m³/s dans la station de Chacha N'mallah.

La variabilité inter-mensuelle des débits est montrée à partir des coefficients de variations (Cv) pour la période 1976-2016 dans les deux stations hydrométriques du bassin versant de l'oued de Srou (Aval Elhri et Chacha N'mallah) (Tableau 6-4)). Dans ces deux stations les mois qui présentent un fort Cv sont les mois des hautes eaux, alors que les mois qui ont un Cv faible sont les mois des basses eaux. Il existe une différence importante avec les précipitations mensuelles pour lesquelles les Cv les plus élevées reviennent toujours aux mois de faibles pluviométries ; mai, juin, juillet, août et septembre et les valeurs de Cv les plus faibles sont observées aux mois de de maximums pluviométriques. C'est-à-dire entre novembre et avril. Ceci peut être expliquées par le fait que les écoulements dans le bassin versant de l'oued de Srou ne dépendent pas uniquement de la pluviométrie, mais aussi des caractéristiques physiques

du bassin. En effet, la forte variabilité observée pendant les mois des hautes eaux est due aux crues qui peuvent survenir et influencées les débits.

Tableau 6-4: Coefficients de variation des modules hydrologiques mensuels des stations d’aval Elhri et Chacha N’mallah période (1976-2016)

| | | J | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D |
|-----------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Aval Elhri | μ | 3,6 | 4,2 | 3,4 | 2,9 | 2,0 | 1,4 | 1,2 | 1,1 | 1,2 | 1,4 | 2,3 | 3,4 |
| | Cv | 0,87 | 1,00 | 0,80 | 0,65 | 0,62 | 0,58 | 0,54 | 0,53 | 0,51 | 0,70 | 0,80 | 1,00 |
| Chacha N’mallah | μ | 13,4 | 17,4 | 13,0 | 9,3 | 5,2 | 3,1 | 2,1 | 1,8 | 2,3 | 3,7 | 7,7 | 11,2 |
| | Cv | 1,11 | 1,22 | 1,09 | 0,77 | 0,76 | 0,63 | 0,57 | 0,52 | 0,71 | 0,95 | 1,15 | 1,02 |

Dans la phase des basses eaux, les eaux souterraines garantissent un écoulement stable et constant pour l’oued de Srou et son affluent l’oued de Chbouka. Pour qui les Cv sont faibles (autours de 0,50) de mai à novembre.

L’oued de Srou et son affluent l’oued de Chbouka présentant un régime pluviale régulée par des apports souterrains dont l’importance varie en fonction des paramètres physiques du bassin.

3. Analyse des débits journaliers dans le bassin du Srou (1976-2016)

Dans le but d’approfondir la connaissance de la variabilité des écoulements dans le bassin versant de l’oued de Srou, on va analyser les débits cette fois à l’échelle journaliers. Les données utilisées concernent les débits journaliers enregistrées dans les stations de Chacha N’mallah et Aval Elhri sur la chronique 1976-2016.

3.1. Débits moyens journaliers

C’est la moyenne de débits journalières de 365 jours de la chronique 1976-2016. Le but est de montrer la variabilité des débits à l’échelle journalier (Figure 6-7).

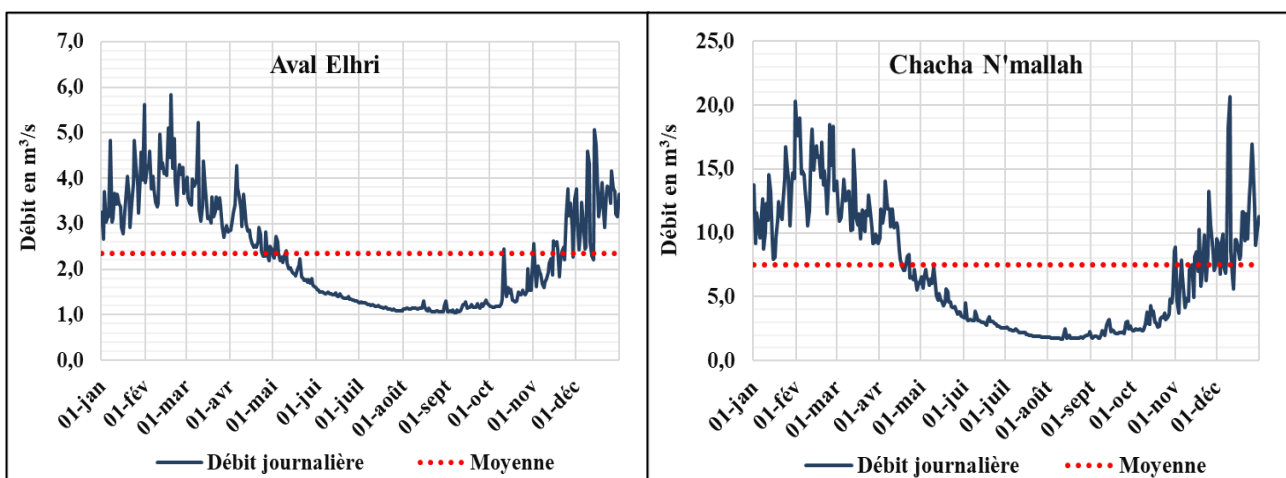


Figure 6-7: Moyenne des débits journaliers sur la période 1976-2016 des stations d’Aval Elhri et Chacha N’mallah

L'intensité de la variabilité est importante entre le mois de novembre et avril, période des hautes eaux. Les débits commencent à augmenter à partir du mois de novembre jusqu'au son maximum entre février et mars, après ils se diminuent. Alors que pendant la période des basses eaux (entre mai et novembre) l'irrégularité disparaît et les débits diminuent jusqu'à un minimum entre le mois d'août et septembre.

Ceci est expliqué par le fait que pendant la période des hautes eaux les écoulements sont influencés par des fortes pluies. Alors que pendant la période des basses eaux les écoulements se stabilisent parce que la seule source d'alimentation est la nappe.

3.2. Débits classés du bassin versant de l'oued de Srou

Les débits journaliers des deux stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah sur la chronique 1976-2016 ont été classés par ordre décroissant (des plus grandes valeurs vers les plus petits). Les graphes (Figure 6-8) présentent les résultats de cette étude.

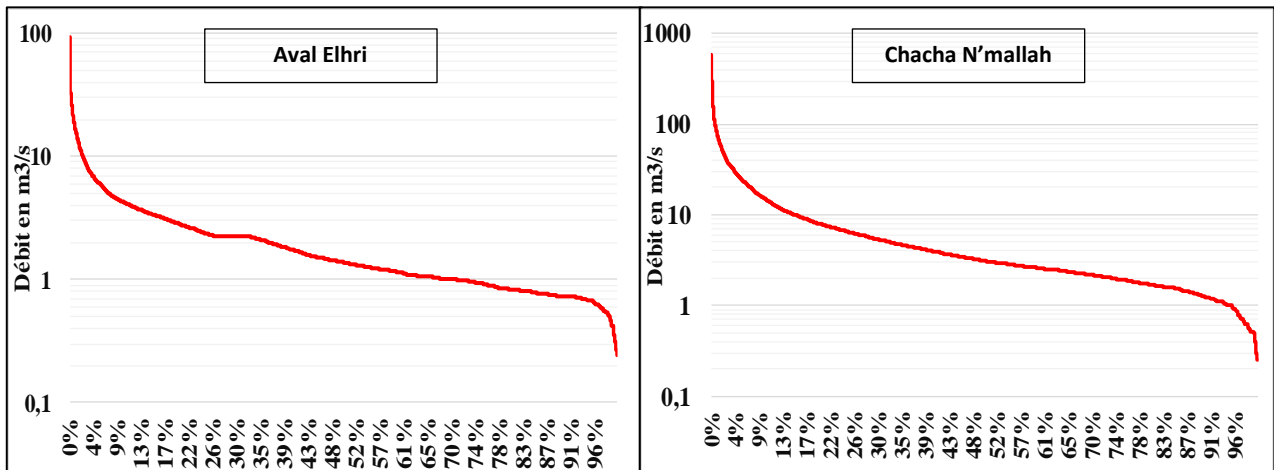


Figure 6-8 : Les débits journaliers classés des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

Dans la station d'Aval Elhri, le débit maximum enregistré pendant la période d'étude est 93.4 m³/s le 09/03/2010, ce qui correspond à 41 fois le module. La plus faible valeur est 0.24 m³/s observée le 07/09/2008.

Au niveau de la station de Chacha N'mallah qui contrôle le débit total du bassin versant de l'oued de Srou, le débit le plus important dans la chronique est 573 m³/s marqué le 10/12/2003 ce qui fait plus de 79 fois le module. Le débit le plus faible est 0.256 m³/s le 11/09/2008.

A partir de la courbe des débits classés on constate que plus de 70 % des débits sont inférieurs ou égaux au module dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka. Dans le bassin versant de l'oued de Srou, plus de 80 % des débits sont inférieurs au module. Ce qui fait un quart ou moins des débits qui dépassent le module, cette situation conduit pratiquement à des débordements (crues) et des grandes phases de sécheresses (étiages).

3.3. Fréquence des débits journaliers

Sur la base d'une classification des débits journaliers des deux stations du bassin versant sur la période d'étude, on va essayer de caractériser les débits les plus fréquents et qui représentent la vraie ressource en eau pour le bassin du Srou (Figure (6-9)).

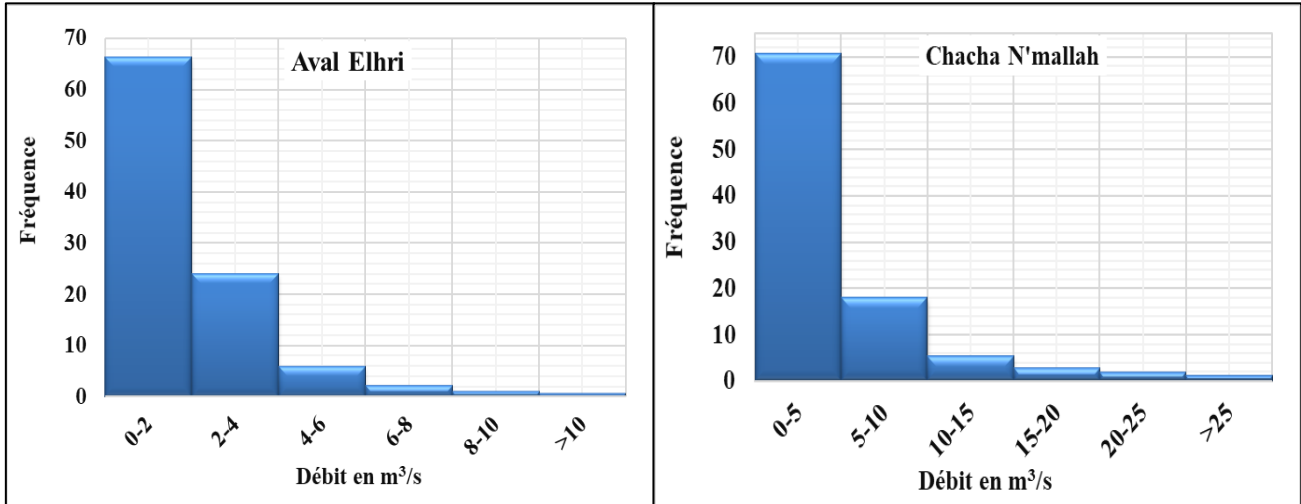


Figure 6-9: Fréquence des débits journaliers dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

- Station d'Aval Elhri : Plus de 66 % des débits journaliers appartient à la classe $[0-2\text{m}^3/\text{s}]$, suivie par la classe $[2-4\text{m}^3/\text{s}]$ avec 24 %. Les autres classes ne dépassent pas les 10 %.
- Station de Chacha N'mallah : Les débits sont importants dans cette station qui représente l'exutoire du bassin entier. La classe $[0-5\text{ m}^3/\text{s}]$ est la plus importante avec 71 % des débits journaliers. En deuxième position vient la classe $[5-10\text{ m}^3/\text{s}]$ qui représente 18 %. Les autres classes ne représentent que 11 %.

D'une façon générale pour les deux stations les valeurs les plus faibles qui dominent, avec des pourcentages qui dépassent les 80 %.

3.4. Analyse des débits minimaux journaliers

Le débit minimal annuel (Q_{\min}) correspond au pic de l'étiage. Il peut être calculé directement sur la série brute des débits journaliers, ou sur la série filtrée par moyenne mobile, minimum mobile ou à partir de la courbe des débits classés annuels. Alors que la date du débit minimal annuel correspondant à la date de l'apparition du pic de l'étiage.

- *Variation des Q_{\min} dans le bassin versant de l'oued de Srou*

Les graphes (Figure 6-10) montrent les pourcentages d'apparition des Q_{\min} selon les mois de l'année, dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah pour la chronique de 1976 à 2016.

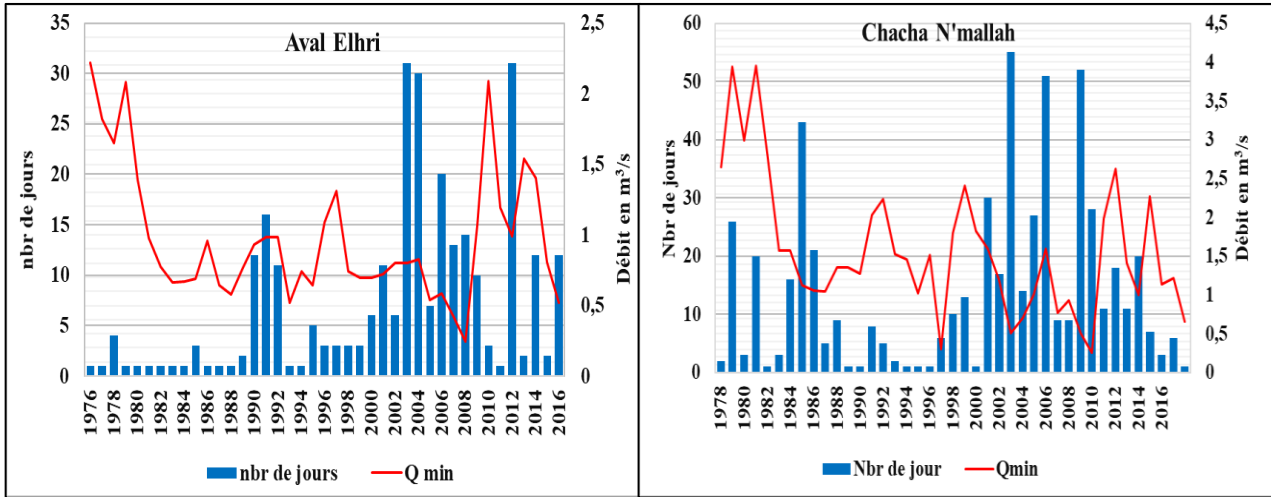


Figure 6-10: Variation du Débit minimum annuel et nombre de jours d'occurrence dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

La variation des Qmin est moins importante dans la station d’Aval Elhri. La faible valeur des Qmin est observé en 2008, il est de l’ordre de 0,24 m³/s. La valeur maximale est de 2,08 m³/s, enregistré en 2010. La moyenne est de l’ordre de 0,91 m³/s. Ces Qmin durent sur des périodes en jours variées avec une tendance dans les dernières années vers l’augmentation. Les plus longues périodes de la chronique sont de l’ordre de 31 jours observées en 2003 et en 2012 avec des Qmin qui sont respectivement 0,79 m³/s et 0,99 m³/s.

Dans la station de Chacha N’mallah, la situation est un peu différente, les Qmin sont importants mais la longueur des périodes de l’occurrence devient aussi importante. La valeur minimale des Qmin est 0,25m³/s observée en 2008, la valeur maximale est de 3,95 m³/s observée en 1979. La valeur moyenne est autours du 1,47 m³/s. En 2001 le Qmin annuel s’est étalé sur 55 jours, c’était la plus longue période de la chronique. Une autre grande période observée en 2007, il est de l’ordre de 51 jours. D’une façon générale, on note une tendance globale vers l’augmentation de ces périodes.

- **Occurrence des Qmin dans le bassin versant de l’oued de Srou**

Dans le sous bassin de l’oued de Chbouka, un nombre important des Qmin est produit en mois d’août (48 %), de juillet (24 %) et du mois septembre (21 %). Des Qmin sont apparus en mois de mars (1 %), juin (1 %), octobre (1 %) et décembre (1 %).

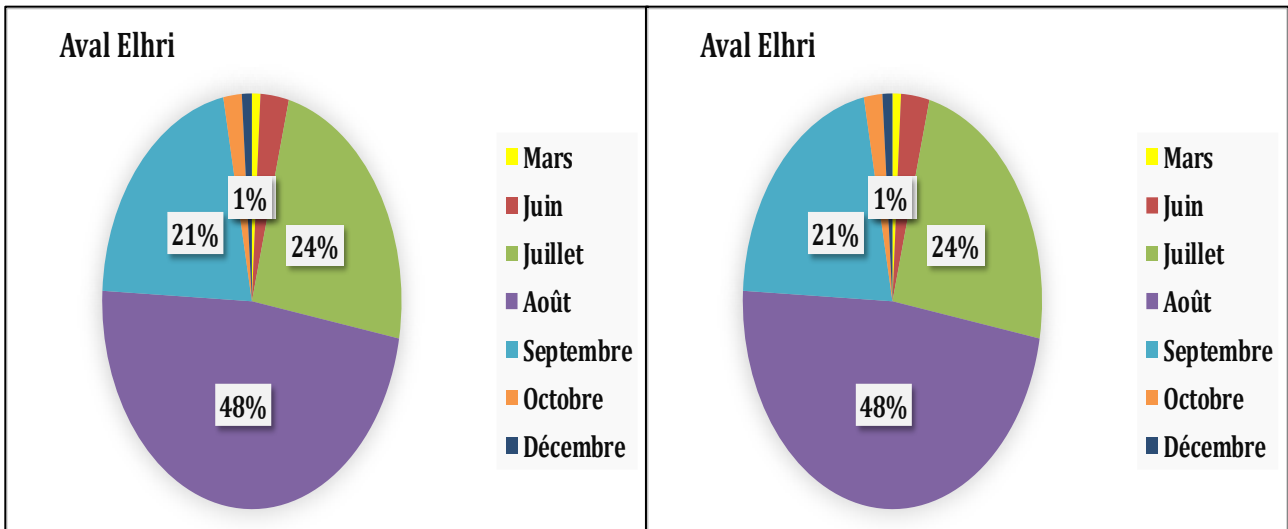


Figure 6-11: Occurrence des Qmin dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Les Qmin de l'oued de Srou au niveau de la station de Chacha N'mallah sont moins dispersés sur l'année, ils sont répartis sur quatre mois. Les maximums des Qmin sont observés en mois d'août (48 %) et en mois de septembre (21%). Les 9 % qui restent sont produits en mois de juillet et d'octobre.

Donc la majeure partie des Qmin du bassin versant de l'oued de Srou se produit en mois d'août avec 48 %.

Axe 15 : Mise au point sur la relation pluie débit dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Après l'étude de la variabilité pluviométrique et hydrométrique à différentes échelles dans les stations du bassin versant, vient l'étude de la relation pluie-débit.

La représentation de la relation pluie-débit permet de transformer des séries temporelles décrivant le climat et la température d'un bassin versant donner (les entrées du modèle hydrologique) en une série de débits (sortie du modèle hydrologique). La modélisation du comportement hydrologique des bassins versants décrits les différentes étapes de la transformation pluie en débit.

Un modèle hydrologique n'est qu'une simplification d'un système complexe (Payraudeau, 2002). Il existe dans la littérature de nombreux modèles hydrologiques ayant chacun leur spécificité du plus simple au plus complexe selon leurs domaines d'application (Decharme, 2005 ; Perrin, 2000). On peut citer les modèles suivants :

- Les modèles à base physique : décomposent les mécanismes internes d'un système en se basant sur la discrétisation du milieu à partir des lois physiques. Les phases du cycle de l'eau sont donc exprimées selon ces lois (Lang, 2007)
- Les modèles empiriques : se proposent d'établir des relations entre les variables d'entrée et les variables de sortie à l'aide d'un ensemble d'équations d'enveloppée et ajustés sur la base des données obtenues sur le système (Hingray et al., 2009).
- Les modèles conceptuels : d'après le Glossaire international de l'hydrologie ces modèles sont utilisés pour simuler le comportement d'un bassin. Ils n'ont pas besoin des lois physiques. La simulation se base sur la connaissance préalable du comportement du bassin.

Dans cette étude, nous allons essayer d'établir la relation entre les débits et les pluies dans le bassin versant de l'oued de Srou d'une façon simple à l'échelle annuelle et mensuelle sur la base des données pluviométriques et hydrométriques des stations du bassin, pour la chronique 1976-2016. Le but de cette analyse est de quantifier la part des précipitations dans la création des écoulements. On calcule aussi le quotient et le déficit d'écoulement.

1. Relation pluie-débit à l'échelle annuelle dans le bassin versant de l'oued de Srou

Après la conversion des modules annuels des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah en lames d'eaux écoulées en (mm). On va représenter sa relation avec les précipitations pluviométriques de la même période enregistrées dans les stations du bassin (Tableau 6-5).

Une faible concordance entre les pluies annuelles et les lames d'eau écoulées dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et le bassin versant de l'oued de Srou. Dans le sous bassin du Chbouka, le maximum pluviométrique de la chronique est de 1611 mm enregistrés en 1996, alors que la lame d'eau maximale (871.1 mm) est observée en une autre année, c'est en 2010. Ce décalage est dû à la situation pluviométrique des années précédente. En effet, l'année 1996 est précédée par deux années de sécheresses les plus sévères surtout dans la partie amont du bassin (station Tamchachat). En 2010 les débits sont importants parce que cette année est précédée d'une année humide 2009. La même observation pour les pluies et les lames d'eau minimales.

Tableau 6-5: Les coefficients d'écoulement moyen annuels dans le Srou (1976-2016)

| | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
|--------------------------------|------------|-----------------|
| Pluviométrie en mm | 606,4 | 490,8 |
| Lame d'eau en mm | 265,1 | 170,7 |
| Déficit d'écoulement | 341,3 | 320,1 |
| Quotient d'écoulement % | 43,7 | 34,8 |

Au niveau du bassin versant de l'oued de Srou, le maximum pluviométrique (984 mm) enregistré en 2010 coïncide avec la lame d'eau maximale (673.5 mm) observée durant la même année. Mais pour les faibles valeurs de la pluviométrie et les lames d'eau sont observées dans des années différentes.

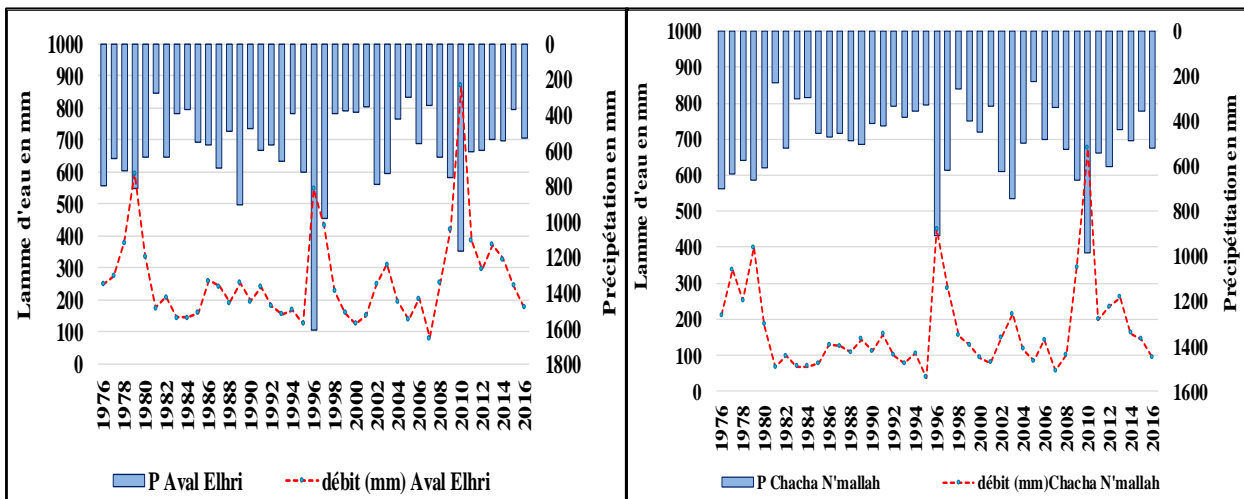


Figure 6-12: Relation pluie-débits dans les stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

D'une façon générale les lames d'eau écoulées dans le bassin ne sont pas en dépendance total avec les entrées pluviométriques. Plusieurs facteurs peuvent provoqués une telle situation, à titre d'exemple ; la nature des précipitations solides ou liquides, l'intensité pluviométrique,

l'évapotranspiration, la situation pluviométrique des années précédentes, la nature géologique du substratum...l'ensemble de ces éléments agissent et modifient les écoulements (SAIDI, 1995).

1.1. Quotient et déficit d'écoulement

Bien que les précipitations enregistrées dans les stations pluviométriques d'Aval Elhri et Chacha N'mallah sont inférieures à la totalité réelle tombée sur les bassins entiers. Du fait de leurs positions dans les exutoires des bassins. Le quotient d'écoulement, qui est le rapport entre la lame d'eau écoulée et la pluviométrie en mm, dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka est de 43.7 %. Dans le bassin versant de l'oued de Srou il est plus faible il est de l'ordre 34.8 %. Ce qui montre que les entrées pluviométriques sont importantes dans les deux bassins, mais elles ne sont pas capables de provoquer des écoulements, parce qu'elles sont produites d'une façon étalée dans le temps.

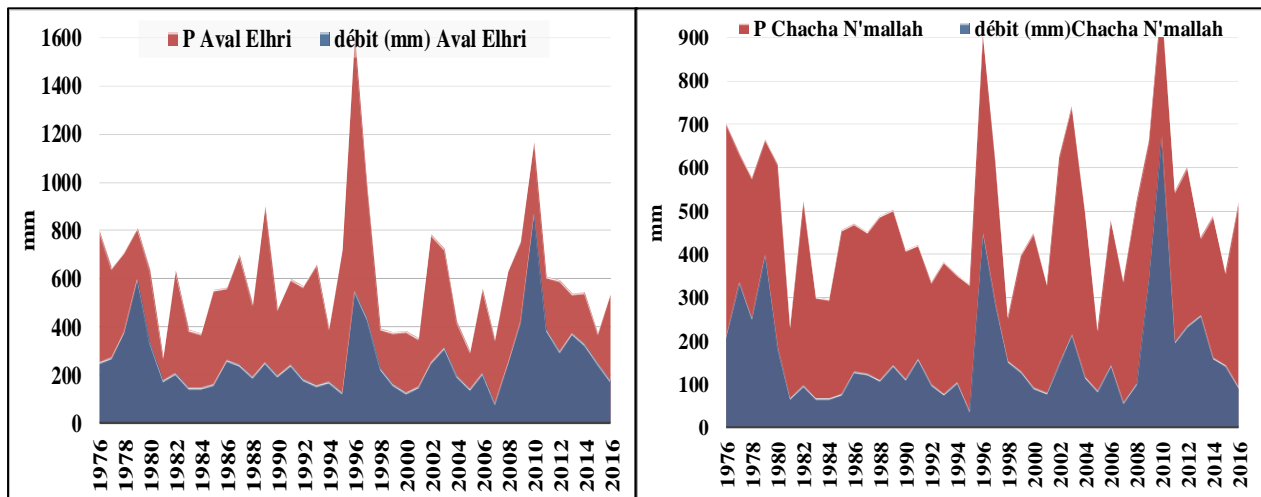


Figure 6-13: le déficit d'écoulement dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

Le déficit d'écoulement (DE) représente la différence entre les pluies du bassin (P) et les hauteurs d'eau moyennes annuelles écoulées (E). Le déficit d'écoulement $DE = P - E$ représente la portion d'eau stocké dans la nappe et l'ETR (COTAGNE, 1948). Le bassin versant de l'oued de Srou connaît un déficit d'écoulement important par rapport à la quantité pluviométrique tombée. Dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka le déficit est moins important.

1.2. Corrélation entre les pluies et les débits des stations du bassin versant de l'oued de Srou

La relation annuelle entre les pluies et les débits est mise en évidence par la méthode de corrélation. Cette dernière a été testée avec succès par (COUTAGNE, 1948) sur un milieu océanique.

Dans l'ensemble du bassin versant de l'oued de Srou la corrélation est proche de 0,70. Ce qui permet de dire qu'une grande partie des pluies qui tombent sortent durant la même année (bassin imperméable sur la grande partie médiane e aval) avec un peu de réserve dans la zone de l'amont (riche en calcaire perméable).

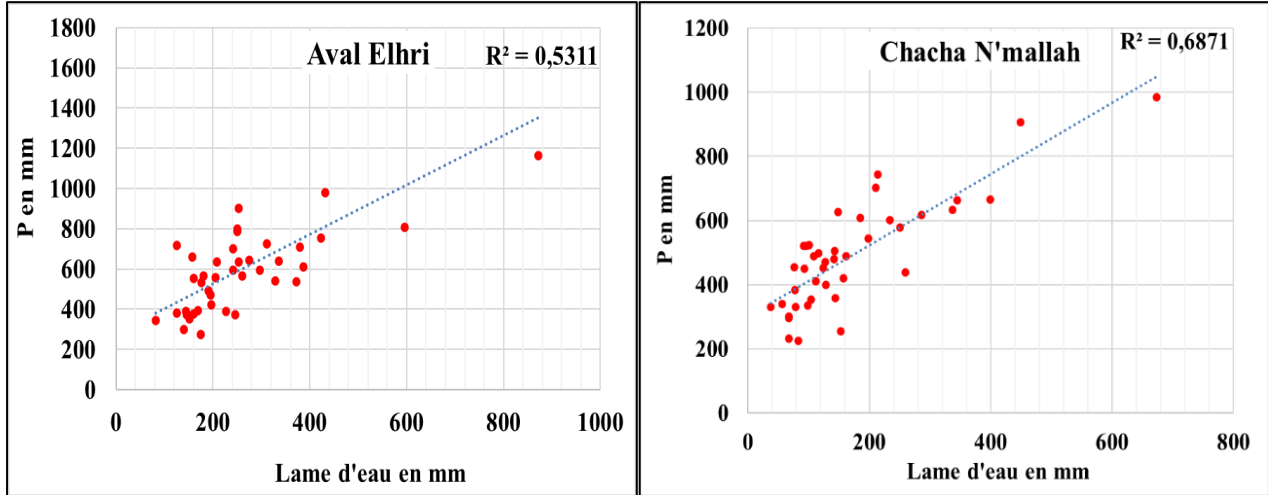


Figure 6-14: Corrélation entre les pluies et les débits dans les stations de d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

A l'inverse le sous bassin versant de l'oued de Chbouka montre un coefficient de corrélation plus faible 0,53. Donc les quantités pluviométriques s'infiltrent (bassin entièrement perméable), Ce qui perturbe la relation annuelle entre les pluies et les débits.

2. Relation pluies débits à l'échelle mensuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou

La compréhension complète de la relation pluies /débits demande de focaliser sur les variations mensuelles. Le but est de déterminer la relation entre les mois les plus pluvieux celles qui connaissent les plus forts débits, et vice versa.

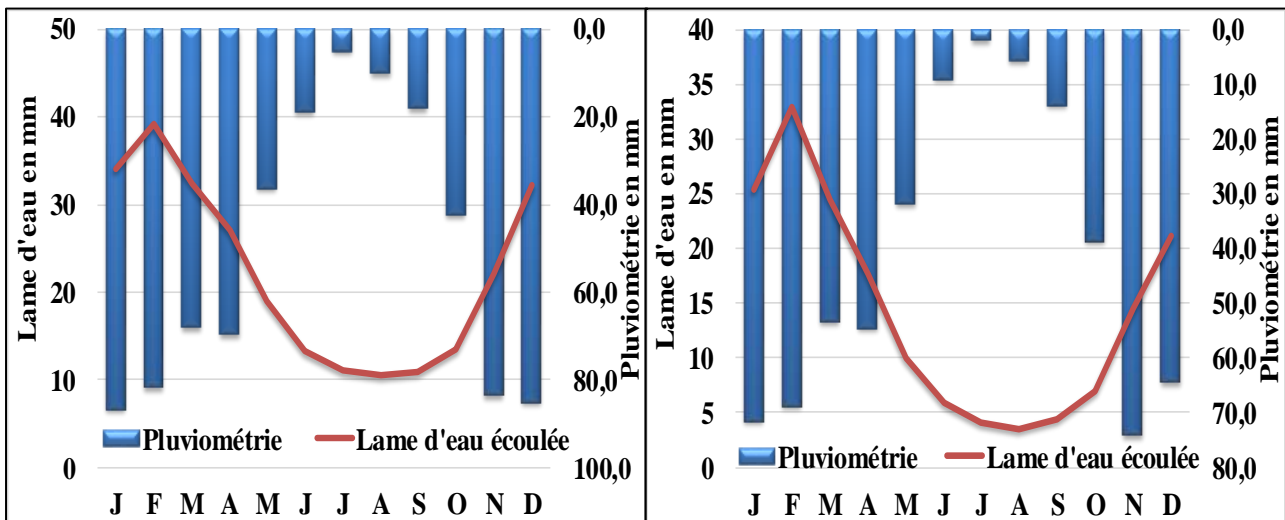


Figure 6-15 : Relation pluies débits à l'échelle mensuelle dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

D'une façon générale, les phases pluviométriques humides et sèches coïncident avec les phases des hautes eaux et des basses eaux. Les maximums pluviométriques s'observent en mois de janvier dans le Chbouka (86,6mm) et novembre dans le Srou (74,2mm). Les lames d'eaux maximales ont été enregistrées pour les deux bassins en mois de février. Ce qui est expliquer par l'effet cumulative des mois qui précèdent. La même explication se porte aux décalages entre les valeurs pluviométriques minimales enregistrées en mois de juillet et les lames d'eau minimales observées en mois d'août.

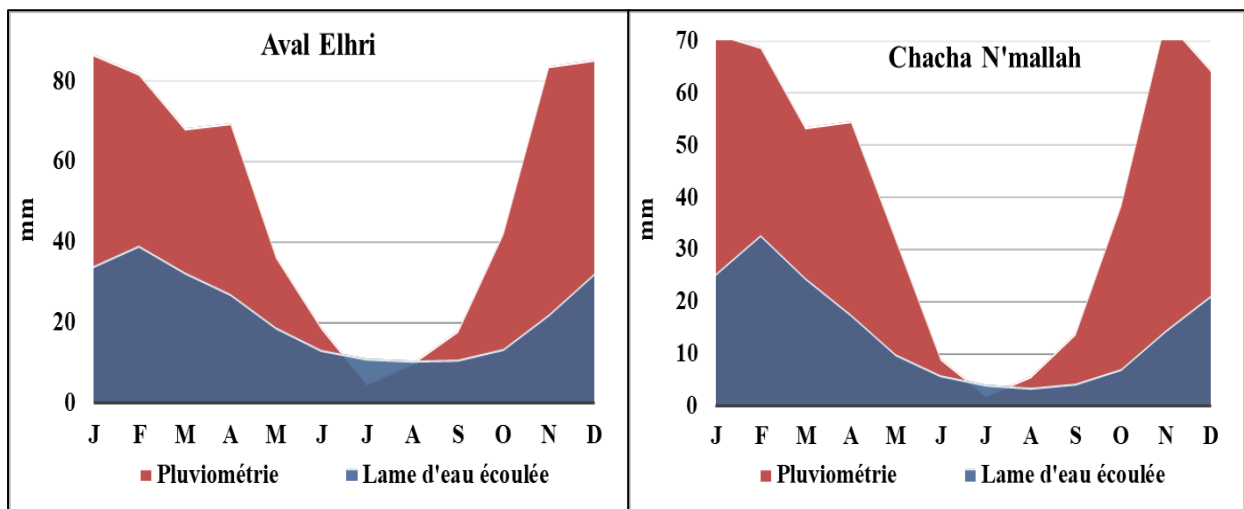


Figure 6-16: Déficit d'écoulement mensuel dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Le déficit d'écoulement est très important pendant la période humide sur la totalité du bassin versant de l'oued de Srou, entre les mois de novembre et avril. Il est aux environ de 45 mm dans le sous bassin versant de Chbouka et de 30 mm dans le bassin versant de l'oued de Srou.

À partir du mois de mai, l'entrée à la période sèche, le déficit est plus faible. En mois de juillet le déficit devient négatif, ce qui signifie qu'on absence des précipitations les nappes soutiennent les écoulements dans le bassin.

La synthèse sur les volumes écoulés aux stations d'Aval Elhri met en évidence l'intensité des écoulements souterrains dans le bassin du Chbouka.

Conclusion du chapitre 6

Le bassin versant de l'oued de Srou s'inscrit bien dans le contexte régional des fleuves du Moyen-Atlas. Sa situation pluviométrique lui garantit une bonne alimentation dans la partie nord-est. Son substratum est imperméable sur une grande partie de sa superficie permet un ruissellement qui favorise l'évaporation.

On retient de cette étude du fonctionnement hydrologique moyen, que le domaine d'étude reçoit des précipitations irrégulières à l'échelle spatio-temporelle. À l'issue de l'analyse des débits, nous avons pu constater l'hétérogénéité de l'écoulement avec une variabilité annuelle et mensuelle qui répond à celle des précipitations. La zone de l'amont du bassin constitue une zone d'alimentation. Elle reçoit en période hivernale des précipitations solides et liquide importante ce qui permet de reconstituer les réserves dans les aquifères, 606 mm dans le sous bassin de Chbouka et 490 pour l'ensemble du bassin. La saison estivale est marquée par un faible débit et une évaporation intense. Durant cette période, le déficit d'écoulement est fort. Cette période bénéficie du soutien des nappes mais leurs apports restent faibles.

Conclusion de la deuxième partie

L'étude climatique du bassin versant de l'oued de Srou sur les deux chroniques (1976-2016) et (1986-2016) a montré que la région bénéficie d'un climat de type méditerranéen, avec des nuances régionales, ce qui influence la répartition de la pluviométrie à l'échelle spatio-temporelle. En effet, la zone nord-est est plus arrosée avec une moyenne de 699 mm contre 490 mm en aval du bassin. Le traitement de la chronique d'étude par la méthode de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 a mis en évidence l'installation des grandes périodes de sécheresse, les plus sévères en 1983 et 2007.

La zone du bassin versant de l'oued de Srou appartient au domaine continental avec un écart thermique qui dépasse les 19 °C entre les mois chauds et les mois froids. La tendance est vers l'augmentation dans les moyennes annuelles de la température. Durant les dernières 30 années, une augmentation est observée au nord du bassin (station Taghat) avec plus de 0.6 °C et au sud (station d'Ahmed Elhansali) avec 1.1 °C. Les conditions de l'évapotranspiration sont différentes. Elle est très importante dans le sud du bassin. Cette variabilité agit sur le disponible de la ressource en eau dans la région.

La variabilité des écoulements reste liée dans sa grande partie à la variabilité et l'abondance des précipitations, ainsi qu'à l'effet de l'évapotranspiration. Grâce au soutien des nappes, l'oued de Srou et l'oued de Chbouka s'échappent de l'assèchement en période des basses eaux.

L'étude des régimes des précipitations, de la température et des débits a mis en évidence la réalité de deux saisons communes :

Une saison humide : elle dure six mois, elle commence en novembre et se termine en avril. Elle connaît une pluviosité importante, avec des températures et d'évapotranspiration faible. Les débits sont importants et présentent leurs max en mois de février.

Une saison chaude : de mai à octobre, elle est caractérisée par des fortes valeurs de températures, l'évapotranspiration est intense surtout en mois de juillet et août. Les débits sont faibles, le minimum est enregistré en mois d'août.

En générale, le fonctionnement hydrologique du bassin du Srou est le résultat de deux types d'écoulements : un ruissellement direct lié aux formations imperméables argileuses de la partie médiane et schisteuses de la partie aval. Un écoulement de base bien visible en période des basses eaux, lié aux réserves calcaires de la partie amont (les causses du Moyen-Atlas).

Partie 3 : Détermination et identification des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2019)

Introduction de la troisième partie

Chapitre 7 : Détermination et analyse des débits d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Chapitre 8: Tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) : extraction et analyse

Chapitre 9 : Cadre réglementaire et propositions des seuils d'étiages

Chapitre 10 : Quantification de la ressources en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou en périodes d'étiage et identification de leurs l'impacts (2016-2019)

Conclusion de la troisième partie

Introduction de la troisième partie

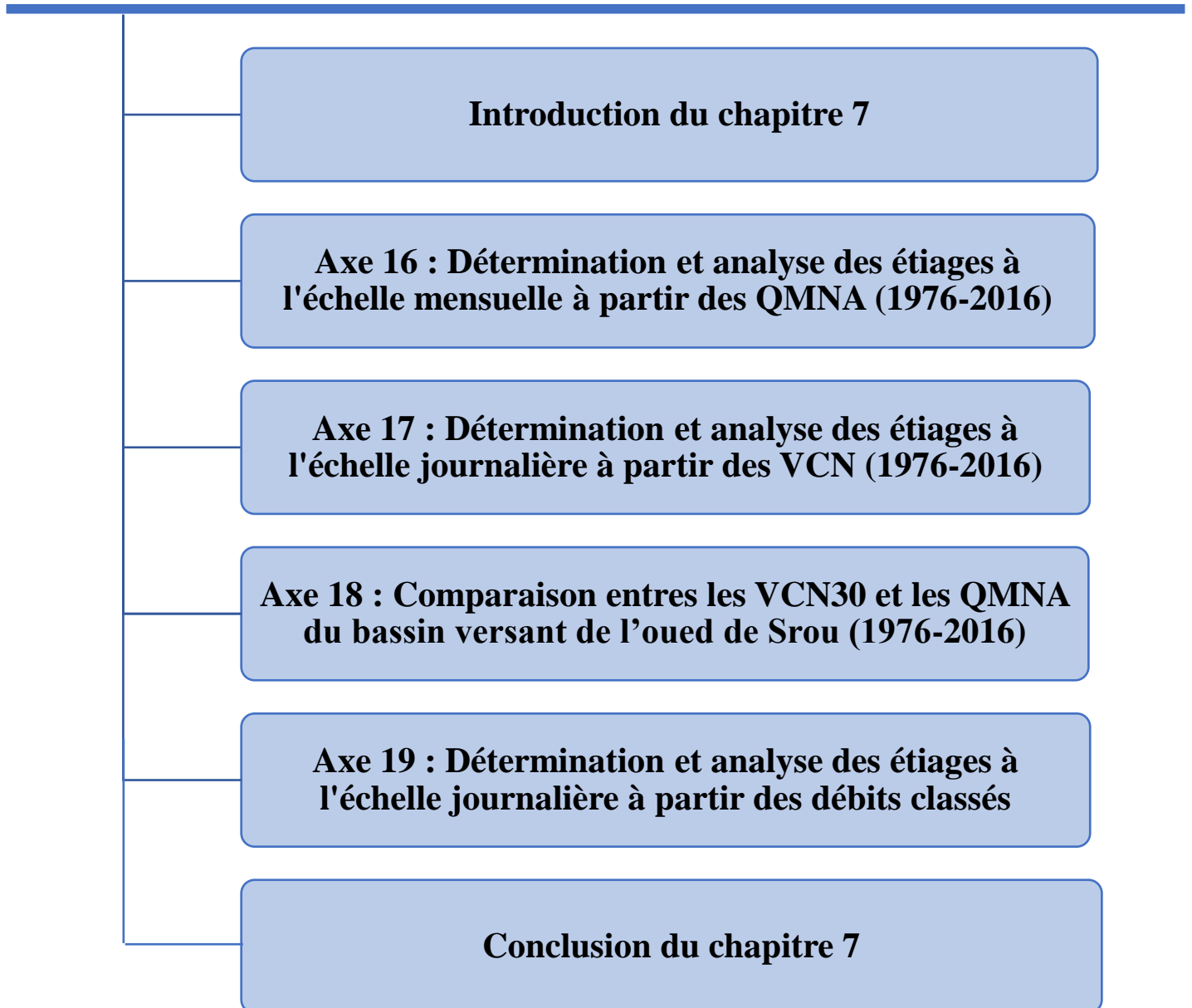
Les bas débits et les débits d'étiage renvoient à la ressource en eau souterraine donc à l'eau « ultime » ou seuil inférieur de la ressource en eau disponible dans un bassin versant. Pour cette raison, la statistique de ces valeurs est fondamentale pour une utilisation rationnelle et pour une gestion de la ressource sans déséquilibre à long terme. De la même manière, "à l'amont du processus de réflexion", la compréhension du phénomène de tarissement conduisant au débit d'étiage et le rapport qu'entretient celui-ci avec les précipitations annuelles apportent les clés d'une gestion efficiente et prédictive de la ressource en eau pour les bassins stratégiques.

En effet, la connaissance des débits d'étiage est de première importance dans la gestion des eaux pour des aspects liés à l'estimation de la ressource disponible et à la préservation de la qualité du biotope rivière (HINGRAY ET AL., 2009 ; STROMBERG ET AL., 2007). Qui plus est, la connaissance des débits d'étiage constitue un enjeu majeur pour une gestion cohérente de la ressource en eau. Comme le soulignent HINGRAY ET AL (2009) « *longtemps négligés, les étiages prennent aujourd'hui une importance croissante aux yeux non seulement des hydrologues mais aussi des autorités et de la population* ». Cette prise de conscience résulte de la pression toujours grandissante sur la ressource en eau des rivières, et du fait que les hasards climatiques et la variabilité saisonnière engendrent rarement une concomitance entre ressource et besoins.

Dans le cadre de notre étude, l'objectif est de déterminer les caractéristiques principales des étiages : débits, genèse, évolution et fréquence d'apparition. Les impacts de cet événement sur la dynamique fluviale, la qualité d'eau et les activités humains. La démarche comprend :

- Une identification et une analyse statistique des débits étiages contemporains.
- Une analyse des phases de tarissement.
- Essais de définition des débits seuils d'étiage pour le bassin versant de l'oued de Srou
- Une régionalisation des débits caractéristiques d'étiage dans le bassin versant.
- Identification des impacts des étiages sur la société et la qualité du milieu.

Chapitre 7 : Détermination et analyse des débits d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)



Introduction du chapitre 7

L'étiage se présente comme un événement qui caractérise la période des basses eaux estivale. Globalement, ce n'est que récemment que les hydrologues se sont attachés aux étiages, alors que les crues constituent depuis longtemps un thème majeur de leurs recherches. La connaissance des débits d'étiages potentiels est fort utile pour évaluer un débit à soutirer, pour maintenir un débit minimal ou pour estimer les charges de contaminants qui peuvent être déversées sans compromettre la protection du milieu aquatique et des usages qui y sont liés (prélèvements, vie aquatique, etc.).

À la suite du questionnaire la totalité de la population interrogée n'a jamais entendus du mot « étiages » (même si on a posé la question en arabe). Nous avons essayé de rapprocher la problématique par d'autres questions, par exemple la hauteur et largeur minimale durant l'année du cours d'eau...etc

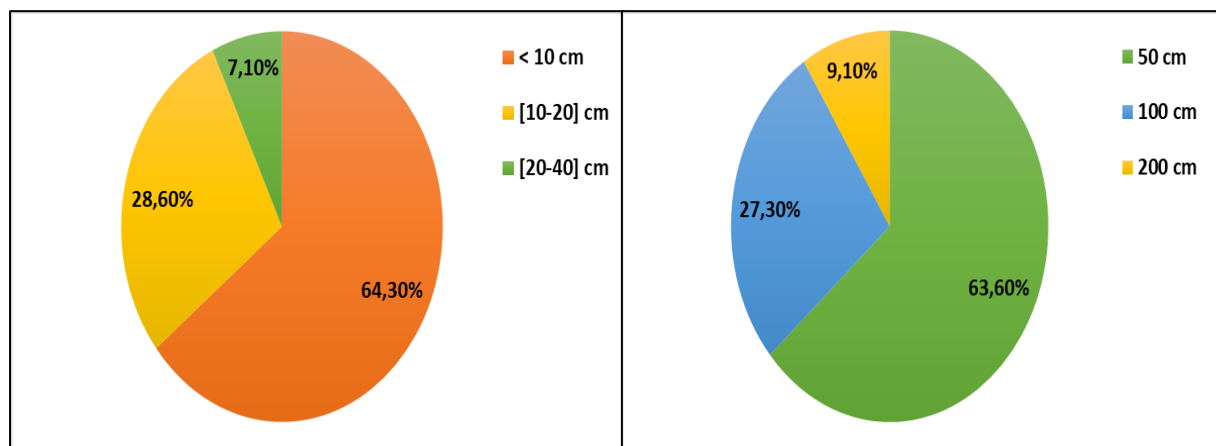


Figure 7-1: La hauteur et largeur minimale de l'oued de Srou

Le niveau le plus bas du cours d'eau principal du bassin versant de l'oued de Srou observé en période estival (étiages) ne dépasse pas les 10 cm. Alors que la largeur minimale durant cette période de l'année ne dépasse les 50 cm.

Cette situation se produit en générale entre les mois de juin et de septembre. La tendance globale selon la population locale est vers l'augmentation des périodes d'étiages et la faiblesse des débits durant ces phases. La situation d'étiage la plus sévère est celle de l'année 2020. L'explication toujours de cette situation est le grand déficit pluviométrique de ces années.

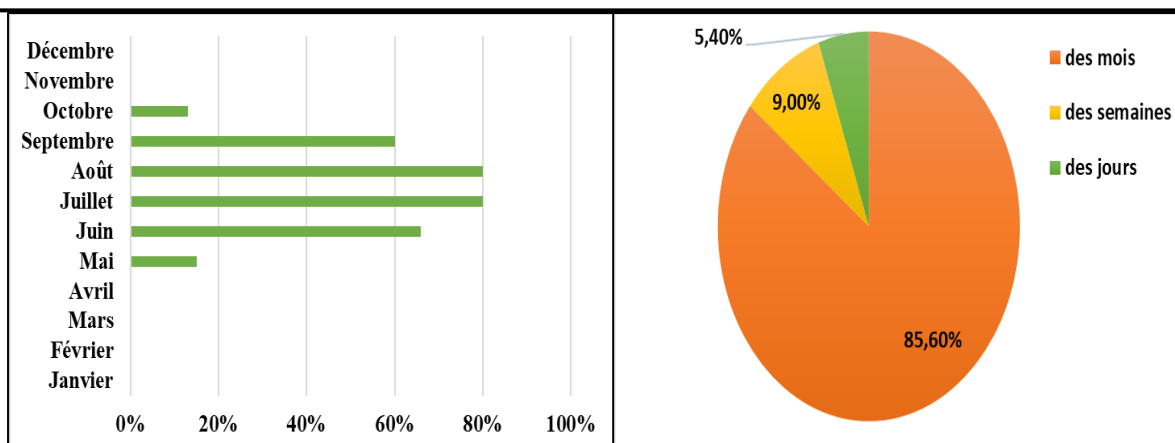


Figure 7-2: Occurrence et durée des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou

L'objectif du présent chapitre est l'identification et la caractérisation des débits d'étiages dans un climat semi-aride. On trouve dans la littérature plusieurs variables qui servent à caractériser les étiages en fonction de l'objectif de l'étude ou de l'existence d'un cadre législatif à des fins de gestion. Nous allons essayer d'élargir le choix, en utilisant le maximum de variables à différents pas de temps. Nous allons choisir trois types de variables :

- QMNA : débit mensuel minimal annuel.
- VCN_d : volume moyen minimal de l'année pendant « d » jours consécutifs.
- D.C : débits issus de la courbe des débits classés.

On note que ces variables ont une étroite relation avec la qualité et la précision des données hydrométriques.

Axe 16 : Détermination et analyse des étiages à l'échelle mensuelle à partir des QMNA (1976-2016)

Dans cet axe nous allons essayer d'identifier les débits d'étiages à l'échelle mensuelle à partir du QMNA. Au début nous allons définir le présent indice ainsi la méthode d'extraction. Nous allons extraire les QMNA des deux stations du bassin versant de l'oued de Srou. Ensuite, une analyse statistique et fréquentielle sera appliquée à la présente variable.

1. Définition et méthode

- *Rappel :*

QMNA est dérivé de « Quantité Mensuelle Minimale Annuelle de fréquence sèche ». Il correspond au débit moyen mensuel minimal annuel. L'extraction des QMNA se fonde généralement sur l'observation du débit moyen mensuel le plus bas de l'année. (Figure 7-3).

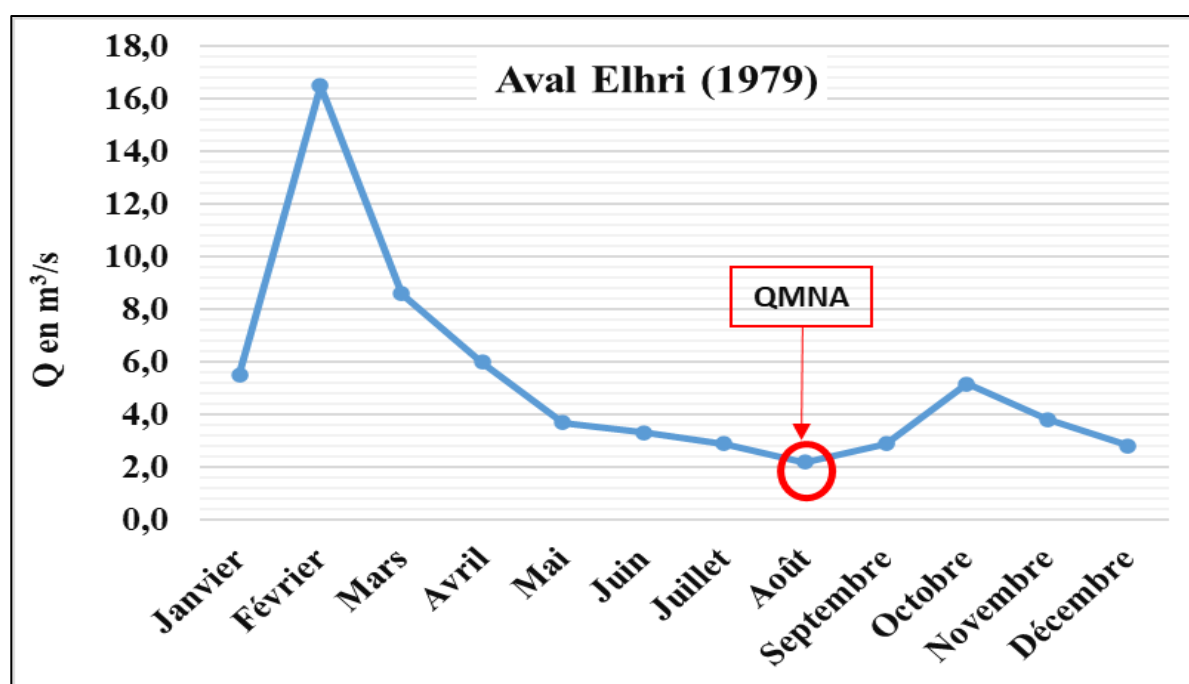


Figure 7-3: Exemple d'identification du QMNA pour la station d'Aval Elhri en 1979

- *Domaine d'utilisation*

Le QMNA est largement utilisé et appliqué dans l'analyse et la caractérisation des débits d'étiages dans les pays francophones (CATALOGNE, 2006 ; LANG, 2007 ; LANG, 2011 ; GAILLIEZ, 2013 ; GARCIA, 2016). Le QMNA est aussi la variable réglementaire en France pour la caractérisation des débits d'étiages d'un cours d'eau. Le QMNA de fréquence 1/5 constitue le débit d'étiage de référence pour l'application de la police de l'eau prescrite par la loi sur l'eau

du 3 janvier 1992. Ce débit avait été choisi par commodité, car il s'agit d'une valeur facile à extraire des « Annuaires hydrologiques ». Puis, avec l'apparition des grandes bases de données informatisées, l'extraction d'autres valeurs s'est trouvée facilitée.

- *Inconvénients des QMNA*

L'échelle calendaire imposée par le QMNA présente des inconvénients qu'il s'agit de prendre en considération dans le cadre d'un suivi et d'une gestion des débits d'étiage, notamment pour éviter une mauvaise évaluation de la situation hydrologique. Les petits cours d'eau situés en tête de bassin et évoluant dans des milieux imperméables doivent être particulièrement bien connus car ils constituent souvent des bassins de référence, annonciateurs du risque d'étiage.

2. Résultats et interprétations

2.1. Quand les étiages du bassin versant de l'oued de Srou apparaissent-ils ?

FRECAUT (1976) définit les étiages comme un événement qui survient pendant la période des basses eaux estivale. Donc un étiage qui apparaît pendant les périodes des basses eaux peut être qualifié événement normal, ou un étiage phénoménal si l'étiage apparaît pendant la phase des hautes eaux.

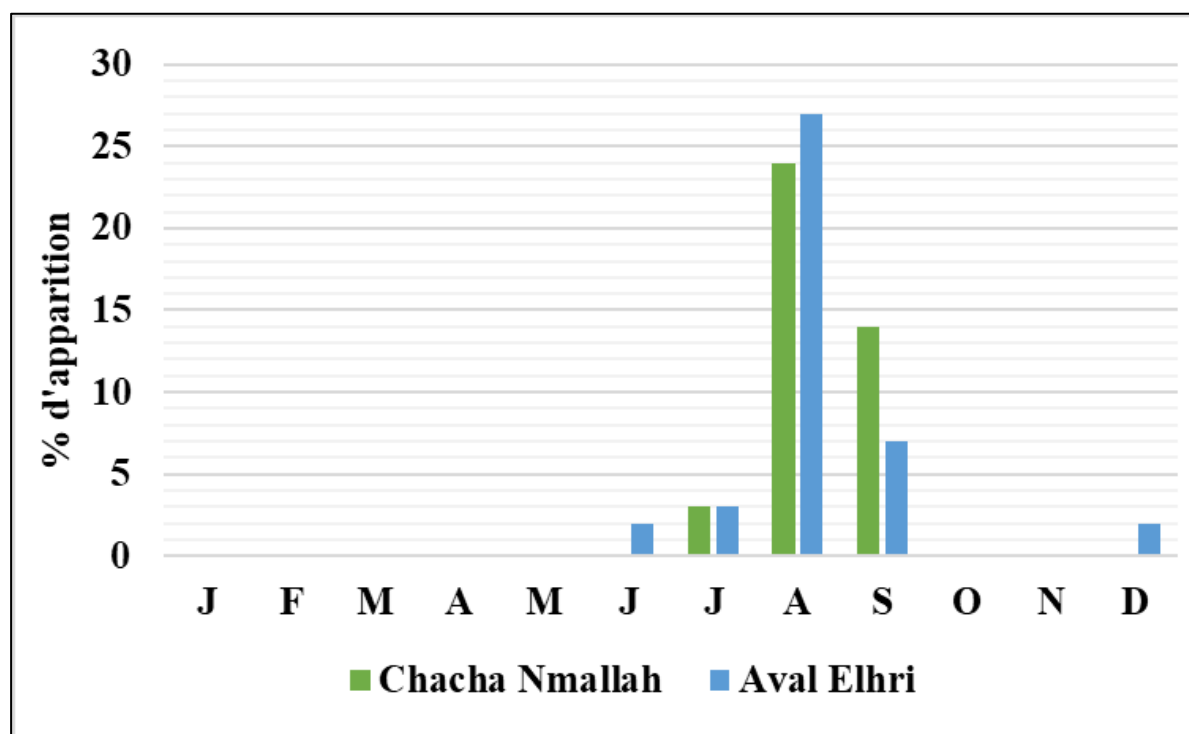


Figure 7-4: Fréquence d'occurrence des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Les étiages normaux dans la phase des basses eaux dans le bassin versant de l'oued de Srou se produisent le plus souvent pendant les mois d'août et de septembre comme la plupart des cours d'eau marocains. Ils coïncident généralement avec le mois au cours duquel l'ETP atteint son maximum et pendant lequel l'apport pluviométrique est relativement faible ou nul (Figure 7-4).

Durant la chronique d'observation (1976-2016) ; les étiages ont été produit ;

- En mois d'août avec plus de 58,5% au niveau de l'oued de Srou et 65,9% au niveau de l'oued de Chbouka.
- En mois de septembre avec 34,1% au niveau de l'oued de Srou et 17% au niveau de l'oued de Chbouka.
- En mois de juin et juillet avec moins de 7% pour les deux cours d'eau.

Deux situations d'étiage anormale observées pendant le mois de décembre au niveau de l'oued Chbouka ; elles sont produites en décembre 2005 et décembre 1994. Ce qui est normal si on considère la situation climatique sèche des deux années.

2.2. Variation des QMNA dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Les séries des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou sur la période 1976-2016 présentent une variabilité importante (Figure 7-5).

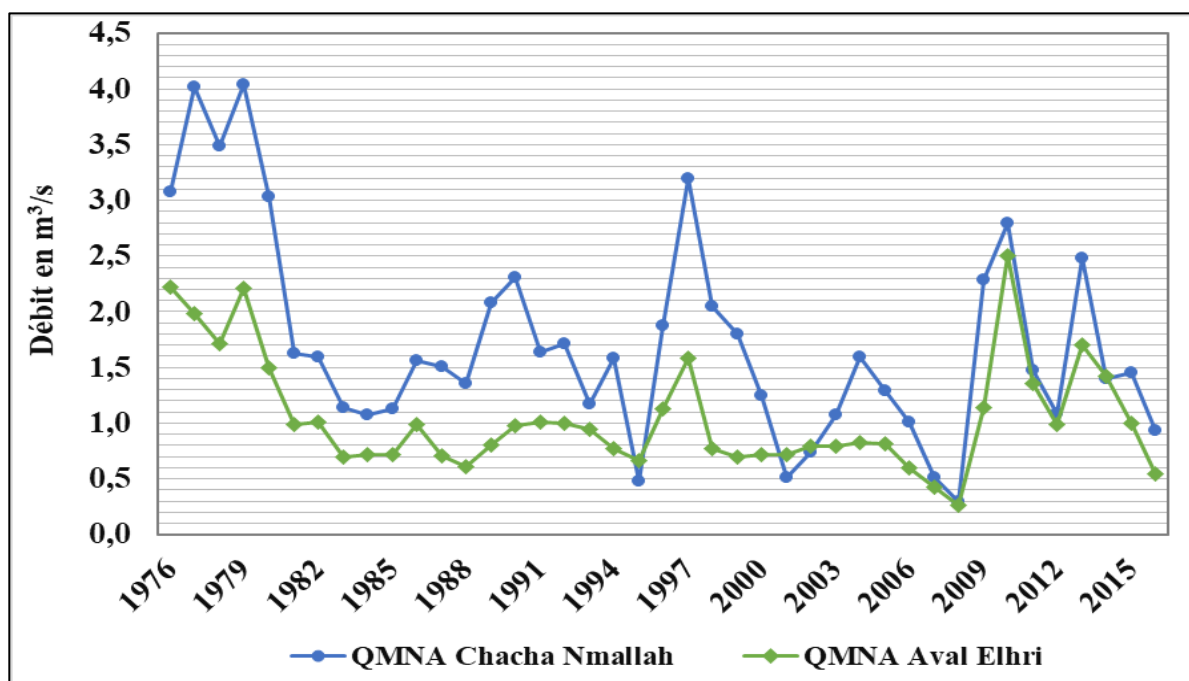


Figure 7-5: Variabilité des QMNA et segmentation de la chronique (1976-2016) des stations Chacha N'mallah et d'aval Elhri

Les coefficients d'asymétrie sont de l'ordre de 48,6 % dans la station d'Aval Elhri et de 53,3% dans la station de Chacha N'mallah.

La moyenne de la période 1976-2016 est 1,63 m³/s dans le Srou et de 1 m³/s dans le Chbouka. Le QMNA max de la station de Chacha N'mallah est de l'ordre de 4,04 m³/s enregistré en 1979, le min est de 0.3 m³/s observé en 2008. Dans la station d'Aval Elhri les QMNA varient entre 2,05 m³/s, comme valeur maximale enregistrée en 2010, et 0.26 m³/s comme valeur minimale observée en 2008.

Compte tenu de la non-stationnarité des débits déjà évoquée, les QMNA sont également analysés en fonction des périodes sèches et humides. C'est pourquoi nous avons testé son homogénéité par la méthode du Cusum (FRANÇOIS ET AL., 1993).

2.3. Traitement des QMNA par la méthode Cusum

La présente méthode est déjà appliquée sur les séries des QMNA par (EL GHACHI, 2007) et (QADEM, 2015). Rappelons que l'objectif de cette méthode est double :

- Vérifier l'homogénéité des chroniques pour déterminer si les paramètres des échantillons (moyenne et écart-type) sont constants et indépendants dans le temps.
- Caractériser la période étudiée en définissant le nombre d'années sèches, d'années humides, et en détectant les sauts de la moyenne, les dérives, etc.

Le graphique du Cusum (Figure 7-6) montre que les fluctuations des QMNA ne diffèrent pas de la variabilité des modules annuels de la chronique étudiée au niveau des tendances sèches ou humides et que les deux séries des stations (Aval Elhri et Chacha N'mallah) sont stationnaires. Ce qui veut dire que ces valeurs sont homogènes.



Figure 7-6 : Cusum des QMNA des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

Sur les graphes des Cusum, les pentes négatives représentent les tendances sèches, alors que les tendances humides correspondent aux pentes positives.

On identifie donc pour la station d'Aval Elhri une succession de trois sous périodes alors que dans la station de Chacha N'mallah on identifie cinq sous périodes (Tableau 7-1). Les sous périodes sèches ont une durée plus importante que celle des sous périodes humides. La seule sous période sèche observée dans la station d'Aval Elhri a durée 26 ans, ce qui fait 66 % des années de la chronique d'étude. Dans la station de Chacha N'mallah la durée des sous périodes sèches s'étale sur 56 % des années d'observation.

Tableau 7-1: Découpage de la chronique (1976-2016) des QMNA des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah

| Station | QMNA moyenne en m ³ /s | Sous période | QMNA des sous périodes en m ³ /s | Nombre d'année | Type |
|-----------------|-----------------------------------|--------------|---|----------------|--------|
| Aval Elhri | 1 | 1976-1982 | 1,7 | 7 | Humide |
| | | 1983-2008 | 0,8 | 26 | Sèche |
| | | 2009-2016 | 1,3 | 8 | Humide |
| Chacha N'mallah | 1,6 | 1976-1982 | 2,9 | 7 | Humide |
| | | 1983-1995 | 1,4 | 13 | Sèche |
| | | 1996-1999 | 2,2 | 4 | Humide |
| | | 2000-2008 | 0,9 | 9 | Sèche |
| | | 2009-2016 | 1,7 | 8 | Humide |

Ce découpage en sous périodes sèches et sous périodes humides est nécessaire pour la compréhension des situations d'étiages les plus extrêmes. Cette situation peut être reliée à la tendance plus ou moins sèche de l'année, et aussi des années antérieures.

En effet, les débits d'étiages les plus faibles de la chronique sont enregistrés en 2008 dans la station d'Aval Elhri et en 1995 dans la station de Chacha N'mallah. Ces deux années correspondent à la fin des longues périodes sèches. La succession des années sèches a provoqué une dégradation progressive des débits et par la suite l'apparition des étiages les plus indigènes dans le bassin versant de l'oued de Srou au cours de ces années.

L'étude de la variabilité ne permet pas de détecter les vrais débits d'étiage. En effet, on trouve dans la chronique des QMNA des valeurs très élevées qui correspondent aux années excédentaires, à titre d'exemple les années 1996 et 2010. Pour cela, on va faire appel à l'étude fréquentielle dans le but de déterminer les débits caractéristiques d'étiages.

2.4. Analyse fréquentielle des QMNA du bassin versant de l'oued de Srou

EL GHACHI (2007) indique que l'analyse fréquentielle des QMNA a pour intérêt de quantifier le caractère plus ou moins exceptionnel d'un étiage. Nous allons essayer d'ajuster les QMNA à une loi de probabilité et par la suite on va déterminer les périodes de retours pour ces valeurs.

- *Ajustement des QMNA à la loi Log-normal*

ABI-ZEID ET BOBEE (1999) ont réalisé une synthèse exhaustive des principales lois appliquées aux débits d'étiage. En France, c'est la loi Log-normale à 2 paramètres qui est la plus communément appliquée : la Banque Hydro, qui propose des traitements statistiques, utilise cette loi pour ajuster les débits d'étiage (QMNA).

DUBREUIL (1974) préconise, pour l'ajustement des débits extrêmes, les lois de Galton, Pearson type 3 et Gumbel. Notons que d'autres lois statistiques peuvent être utilisées pour l'ajustement des QMNA : Weibull, Gumbel, Pearson, GEV, Pareto... (TALLAKSEN, 2004). Ces lois n'ont pas été testées car l'expérience montre que les écarts entre les quantiles obtenus par les différentes lois sont négligeables pour des fréquences relativement « banales » (inférieures à 20 ans).

L'ajustement graphique des QMNA des stations de Chacha N'mallah et d'aval Elhri sur la période étudiée précédemment à la loi Log-normale semble satisfaisant. Ce qui est confirmé par le test de Komolgorov-Smirnov (BRUNET MORET, 1978) (Figure 7-7).

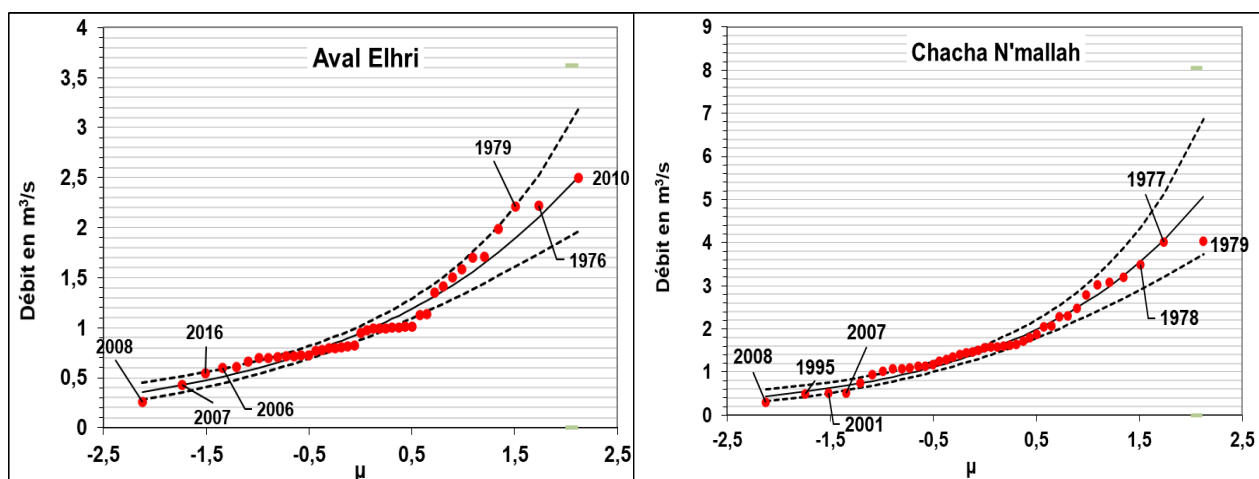


Figure 7-7: Ajustement des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou à la loi Log-normal (1976-2016)

Les étiages les plus sévères de la chronique d'étude (1976-2016) ont été observés respectivement durant les années 2008, 2007, 2016 et 2006 dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka à la station d'Aval Elhri et en 2008, 1995, 2001 et 2007 dans le bassin versant de

l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah. Il n'y a pas d'étiage sévère de 1976 à 1982. Ceci est conforme aux résultats déjà obtenus lors de l'analyse hydro-climatique.

- **Les débits fréquents d'étiages**

Sur la base de l'ajustement déjà réalisé nous avons calculé les débits fréquents de durées de retours de 2, 5 et 10 ans (Tableau 7-2).

Les quantiles des débits d'étiage évalués à partir de la loi log normale dans le bassin versant de l'oued de Srou varient pour une période de retour donnée en fonction des différentes stations. C'est en cela que la station de Chacha N'mallah, qui est l'exutoire donc la station la plus en aval de ce bassin, possède des quantiles supérieurs à ceux de la station d'Aval Elhri quelle que soit la période de retour choisie.

Tableau 7-2:Fréquence de retour pour les QMNA dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Stations | Unité | 1/2 | 1/5 | 1/10 | Rapport (F1/2: F1/10) |
|-----------------|---------------------|-------|-------|--------|--------------------------|
| | | 2 ans | 5 ans | 10 ans | |
| Aval Elhri | m ³ /s | 1,040 | 0,610 | 0,390 | 2,66 |
| | l/s/km ² | 3,796 | 2,226 | 1,423 | |
| Chacha N'mallah | m ³ /s | 1,720 | 0,940 | 0,540 | 3,18 |
| | l/s/km ² | 1,252 | 0,684 | 0,393 | |

Le quantile 1/5 correspond au débit d'entrées aux étiages selon la loi française de l'eau. Dans la station d'Aval Elhri il est de l'ordre de 0,610 m³/s (soit 2,226 l/s/km²), alors que dans la station de Chacha N'mallah il est de l'ordre de 0,940 m³/s (0,684 l/s/km²).

Le rapport entre le débit médian et le débit décennal est faible au niveau du sous bassin de l'oued de Chbouka (2,66), alors qu'à Chacha N'mallah, il est relativement plus fort (3,18). Cette différence montre bien que, dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka, les étiages sont généralement bien soutenus par les eaux souterraines que dans le bassin versant de l'oued de Srou.

2.5. Indice de sévérité d'étiage

Le débit mensuel minimal permet de calculer un indice qui caractérise la sévérité d'étiage. L'indice de sévérité d'étiage « ISE » correspond au rapport exprimé en pourcentage

du débit mensuel minimal d'une année particulière au débit moyen annuel. Plus cet indice est faible, plus forte sera la sévérité des étiages (SERBOUT, 2001).

La première remarque qu'on peut tirer des valeurs de cet indice (Tableau 7-3), c'est que la sévérité est liée principalement à l'hydraulicité. En effet, l'indice de sévérité donne des résultats similaires à celles déjà obtenus lors de l'analyse fréquentielle et statistique. Les faibles indices de sévérité sont observées dans la station de Chacha N'mallah en 1995, 2001, 2007 et 2008, alors que dans la station d'Aval Elhri, la sévérité des étiages ne semble pas très prononcée. Ceci montre aussi l'importance du soutien des réservoirs karstiques et l'alimentation pluviale en amont du sous bassin versant de l'oued de Chbouka.

Tableau 7-3: indice de sévérité d'étiage des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Année | Aval Elhri | Chacha N'mallah | Année | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
|-------|------------|-----------------|------------|------------|-----------------|
| 1976 | 93 | 40 | 1998 | 33 | 27 |
| 1977 | 84 | 52 | 1999 | 29 | 23 |
| 1978 | 72 | 46 | 2000 | 30 | 16 |
| 1979 | 93 | 53 | 2001 | 30 | 7 |
| 1980 | 63 | 40 | 2002 | 34 | 10 |
| 1981 | 42 | 21 | 2003 | 34 | 14 |
| 1982 | 43 | 21 | 2004 | 35 | 21 |
| 1983 | 29 | 15 | 2005 | 34 | 17 |
| 1984 | 30 | 14 | 2006 | 25 | 13 |
| 1985 | 30 | 15 | 2007 | 18 | 7 |
| 1986 | 42 | 20 | 2008 | 11 | 4 |
| 1987 | 30 | 20 | 2009 | 48 | 30 |
| 1988 | 26 | 18 | 2010 | 105 | 37 |
| 1989 | 34 | 27 | 2011 | 57 | 19 |
| 1990 | 41 | 30 | 2012 | 42 | 14 |
| 1991 | 42 | 21 | 2013 | 72 | 32 |
| 1992 | 42 | 22 | 2014 | 60 | 18 |
| 1993 | 40 | 15 | 2015 | 42 | 19 |
| 1994 | 32 | 21 | 2016 | 23 | 12 |
| 1995 | 28 | 6 | | | |
| 1996 | 47 | 24 | | | |
| 1997 | 67 | 42 | | | |
| | | | Moyenne | 44,13 | 22,51 |
| | | | Ecart-type | 21,45 | 12,01 |

2.6. Apport des QMNA pour les gestionnaires

Les QMNA comme nous avons mentionné précédemment sont des valeurs facilement extraites des séries hydrologiques mensuelles. Ils peuvent être utilisé comme seuil de débit

d'étiage dans les bassins versants. Dans notre cas, dans le bassin versant de l'oued de Srou, de climat semi-aride. Les débits caractéristiques d'étiages issus des QMNA sont donc :

- Pour la station d'Aval Elhri : le QMNA (2) est de $1,040 \text{ m}^3/\text{s}$ et le QMNA (5) est de l'ordre de $0,610 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Dans la station de Chacha N'mallah : le QMNA (2) est de $1,720 \text{ m}^3/\text{s}$ et le QMNA (5) est de l'ordre de $0,940 \text{ m}^3/\text{s}$.

Axe 17 : Détermination et analyse des étiages à l'échelle journalière à partir des VCN (1976-2016)

L'étude des étiages à l'échelle mensuelle pouvait masquer des situations d'étiage très sévères (LANG, 2007). Nous abordons donc également l'étiage au pas de temps journalier à partir des VCNd.

1. Définition et méthodes

- **Rappel**

Le VCNd (Volume Consécutif Minimal pour d jours) ou MAMd (en anglais pour Mean Annual d-day Minimum flow) correspond au débit moyen minimal annuel non dépassé pendant d jours consécutifs (GARCIA, 2016).

- **Domaine d'utilisation**

Ces indicateurs sont les plus communément employés pour la caractérisation de la sévérité des étiages. Dans la littérature, la durée d prend usuellement des valeurs égales à 1, 3, 5, 10 ou 30 jours, néanmoins des durées plus longues peuvent être parfois utilisées pour caractériser la sévérité étiages sur le long terme (de $d = 90$ jusqu'à $d = 284$ jours) (MCMAHON ET MEINE (1986), MIDGLEY ET AL. (1994)). La durée optimale pour le calcul des VCNd doit être en relation avec la définition que l'on attribue à l'étiage, mais aussi avec le caractère plus ou moins anthropisé des cours d'eau.

Le VCN7 est connue sous le nom de débit par temps sec (HINDLEY, 1973) ou sous le nom de débit minimum annuel moyen sur 7 jours (MAM7) (PIRT ET SIMPSON, 1983 ; GUSTARD ET AL., 1992) et est utilisé au Royaume-Uni par pour les licences d'abstraction. La période de 7 jours couverte par MAM7 élimine les variations quotidiennes de la composante artificielle du débit du fleuve. De plus, une analyse basée sur une série chronologique de débit moyens sur 7 jours est moins sensible aux erreurs de mesure. Dans le même temps, dans la majorité des cas, il n'y a pas de grande différence entre les faibles débits sur 1 jour et 7 jours (SMAKHTIN ; 2001).

- **Méthode d'identification**

Les VCNd sont extraites annuellement en fonction d'une durée fixée de d jours. Des moyennes mobiles calculées à partir des débits moyens journaliers sur d jours consécutifs aboutissent au calcul des VCNd (LANG, 2007). L'extraction des VCNd est basé sur un

logarithme dont lequel on admet un premier taux de 33% de lacunes pour le calcul de la moyenne glissante. Ensuite, pour le calcul du minimum annuel de la série des moyennes glissantes, seules ont été prises en compte les valeurs des moyennes glissantes inférieures au débit moyen annuel, et un taux de 10% de lacunes sur ces valeurs a été autorisé (Figure 7-8).

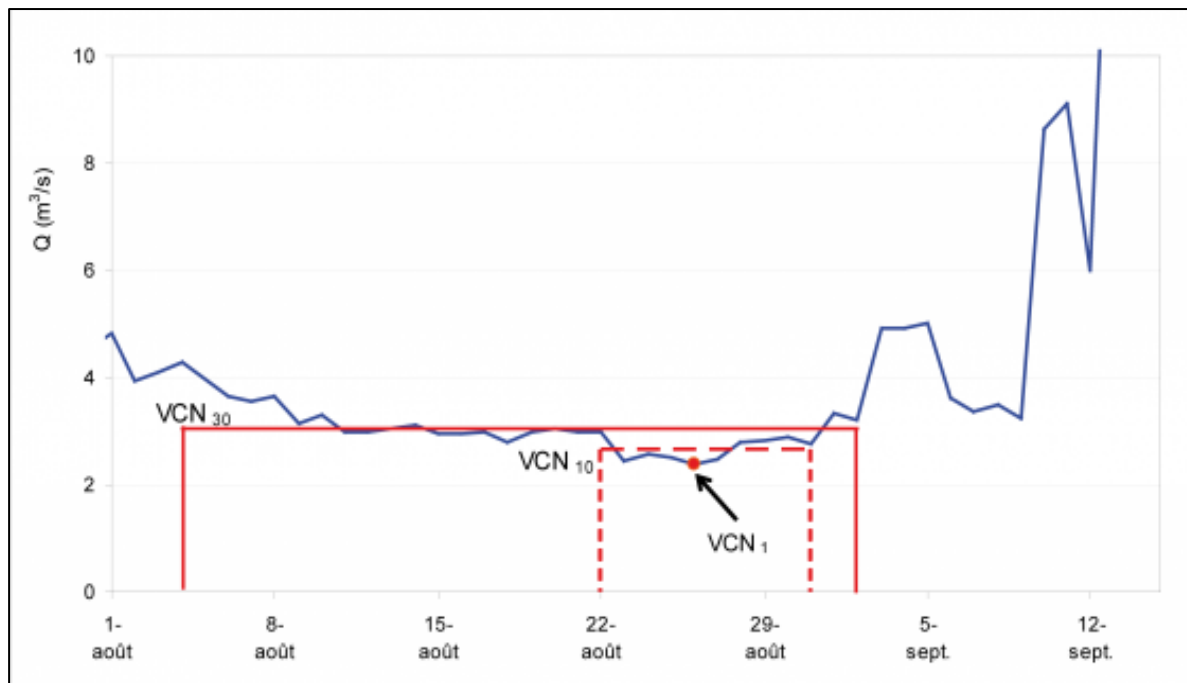


Figure 7-8 : Exemple de VCNd de durées 1, 10 et 30 jours - La Moselle à Epinal en 1976, d'après les données de la Banque HYDRO (Lang, 2011)

- **Avantage des VCNd**

L'utilisation des VCNd dans l'identification des débits d'étiages serait opportun à la place des QMNA afin de limiter l'influence des précipitations (LANG, 2004). La nécessité de compléter les valeurs moyennes déterminées dans un cadre mensuel arbitraire, par des valeurs moyennes d'une série de jours consécutifs, est une idée déjà soumise par FRECAUT (1975).

2. Résultats et interprétations

Les valeurs des VCNd ont été calculées pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou. Les résultats sont présentés dans les tableaux (7-4 et 7-5). Vue le grand nombre d'indices, on va séparer l'analyse pour les deux stations.

La première observation qu'on peut tirer des séries des VCNd des deux stations c'est que certains indices sont presque similaires voir identiques parfois. Pour l'objectif d'éviter la redondance dans l'analyse, on doit choisir ceux qui sont représentatifs des situations d'étiage dans notre climat. Nous allons passer à la comparaison des différents VCNd.

Tableau 7-4 : Les VCNd de la station d'Aval Elhri (1976-2016)

| Année | Station Aval Elhri | | | | | | | | |
|-------|--------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | VCN 1 | VCN 3 | VCN 5 | VCN 10 | VCN 15 | VCN 20 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 |
| 1976 | 2,000 | 2,003 | 2,020 | 2,091 | 2,178 | 2,262 | 2,397 | 2,492 | 2,817 |
| 1977 | 1,820 | 1,843 | 1,854 | 1,872 | 1,889 | 1,908 | 1,959 | 2,037 | 2,098 |
| 1978 | 1,650 | 1,653 | 1,652 | 1,665 | 1,679 | 1,690 | 1,707 | 1,751 | 1,792 |
| 1979 | 2,080 | 2,087 | 2,094 | 2,117 | 2,127 | 2,142 | 2,185 | 2,356 | 2,570 |
| 1980 | 1,390 | 1,407 | 1,420 | 1,439 | 1,445 | 1,447 | 1,447 | 1,498 | 1,585 |
| 1981 | 0,974 | 0,976 | 0,978 | 0,981 | 0,981 | 0,982 | 0,985 | 0,994 | 1,015 |
| 1982 | 0,775 | 0,780 | 0,785 | 0,797 | 0,810 | 0,810 | 0,992 | 1,003 | 1,010 |
| 1982 | 0,661 | 0,662 | 0,667 | 0,677 | 0,686 | 0,690 | 0,698 | 0,709 | 0,715 |
| 1983 | 0,673 | 0,676 | 0,679 | 0,681 | 0,690 | 0,693 | 0,703 | 0,714 | 0,742 |
| 1985 | 0,690 | 0,690 | 0,692 | 0,693 | 0,695 | 0,697 | 0,701 | 0,719 | 0,731 |
| 1986 | 0,959 | 0,963 | 0,971 | 0,978 | 0,981 | 0,983 | 0,986 | 0,993 | 0,998 |
| 1987 | 0,641 | 0,650 | 0,655 | 0,659 | 0,668 | 0,682 | 0,682 | 0,702 | 0,771 |
| 1988 | 0,580 | 0,589 | 0,593 | 0,600 | 0,601 | 0,603 | 0,610 | 0,634 | 0,667 |
| 1989 | 0,768 | 0,770 | 0,776 | 0,784 | 0,791 | 0,791 | 0,794 | 0,805 | 0,820 |
| 1990 | 0,934 | 0,934 | 0,934 | 0,934 | 0,934 | 0,935 | 0,943 | 1,003 | 1,020 |
| 1991 | 0,985 | 0,985 | 0,985 | 0,985 | 0,985 | 0,987 | 0,995 | 1,021 | 1,079 |
| 1992 | 0,985 | 0,985 | 0,985 | 0,985 | 0,986 | 0,992 | 0,998 | 1,009 | 1,024 |
| 1993 | 0,519 | 0,528 | 0,622 | 0,803 | 0,864 | 0,893 | 0,922 | 0,939 | 0,943 |
| 1994 | 0,740 | 0,767 | 0,767 | 0,767 | 0,767 | 0,767 | 0,767 | 0,812 | 0,803 |
| 1995 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,644 | 0,651 | 0,674 | 0,681 |
| 1996 | 1,090 | 1,090 | 1,090 | 1,090 | 1,091 | 1,101 | 1,122 | 1,203 | 1,267 |
| 1997 | 1,310 | 1,310 | 1,316 | 1,336 | 1,365 | 1,369 | 1,425 | 1,512 | 1,606 |
| 1998 | 0,744 | 0,744 | 0,746 | 0,758 | 0,762 | 0,764 | 0,766 | 0,774 | 0,799 |
| 1999 | 0,694 | 0,694 | 0,694 | 0,694 | 0,694 | 0,694 | 0,694 | 0,694 | 0,697 |
| 2000 | 0,698 | 0,698 | 0,698 | 0,707 | 0,714 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,722 |
| 2001 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,722 | 0,728 |
| 2002 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,809 |
| 2003 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,798 | 0,806 |
| 2004 | 0,824 | 0,824 | 0,824 | 0,824 | 0,824 | 0,824 | 0,824 | 0,824 | 0,829 |
| 2005 | 0,541 | 0,541 | 0,541 | 0,542 | 0,555 | 0,573 | 0,793 | 0,830 | 0,865 |
| 2006 | 0,584 | 0,584 | 0,584 | 0,584 | 0,584 | 0,584 | 0,584 | 0,613 | 0,648 |
| 2007 | 0,424 | 0,424 | 0,424 | 0,424 | 0,424 | 0,424 | 0,424 | 0,427 | 0,457 |
| 2008 | 0,244 | 0,244 | 0,244 | 0,244 | 0,244 | 0,244 | 0,250 | 0,273 | 0,296 |
| 2009 | 1,070 | 1,070 | 1,070 | 1,070 | 1,079 | 1,085 | 1,092 | 1,167 | 1,207 |
| 2010 | 2,090 | 2,090 | 2,110 | 2,182 | 2,279 | 2,340 | 2,468 | 2,543 | 2,693 |
| 2011 | 1,190 | 1,203 | 1,208 | 1,256 | 1,291 | 1,305 | 1,319 | 1,359 | 1,366 |
| 2012 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 1,001 | 1,007 |
| 2013 | 1,540 | 1,550 | 1,564 | 1,575 | 1,616 | 1,629 | 1,653 | 1,737 | 1,869 |
| 2014 | 1,400 | 1,400 | 1,400 | 1,403 | 1,405 | 1,407 | 1,416 | 1,456 | 1,489 |
| 2015 | 0,810 | 0,827 | 0,828 | 0,836 | 0,843 | 0,862 | 0,942 | 1,081 | 1,097 |
| 2016 | 0,520 | 0,520 | 0,520 | 0,520 | 0,531 | 0,538 | 0,545 | 0,553 | 0,562 |

Tableau 7-5 : Les VCNd de la station de Chacha N'mallah (1976-2016)

| Année | Station Chacha N'mallah | | | | | | | | |
|-------|-------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | VCN 1 | VCN 3 | VCN 5 | VCN 10 | VCN 15 | VCN 20 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 |
| 1976 | 2,65 | 2,65 | 2,67 | 2,74 | 2,83 | 2,91 | 3,05 | 3,14 | 3,47 |
| 1977 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,94 | 3,96 | 4,14 | 4,32 |
| 1978 | 2,99 | 2,99 | 3,03 | 3,15 | 3,22 | 3,30 | 3,38 | 3,43 | 3,62 |
| 1979 | 3,95 | 3,95 | 3,95 | 3,95 | 3,95 | 3,95 | 4,00 | 4,32 | 5,32 |
| 1980 | 2,83 | 2,83 | 2,86 | 2,88 | 2,91 | 2,92 | 2,94 | 3,03 | 3,20 |
| 1981 | 1,57 | 1,57 | 1,58 | 1,60 | 1,61 | 1,61 | 1,62 | 1,63 | 1,66 |
| 1982 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,57 | 1,58 | 1,59 | 1,64 | 1,75 |
| 1982 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,13 | 1,14 | 1,14 | 1,16 |
| 1983 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,07 | 1,08 | 1,12 | 1,16 |
| 1985 | 1,05 | 1,05 | 1,06 | 1,09 | 1,10 | 1,10 | 1,11 | 1,15 | 1,21 |
| 1986 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,36 | 1,39 | 1,43 | 1,45 | 1,57 | 1,61 |
| 1987 | 1,35 | 1,40 | 1,41 | 1,46 | 1,49 | 1,50 | 1,49 | 1,51 | 1,69 |
| 1988 | 1,28 | 1,30 | 1,32 | 1,34 | 1,35 | 1,35 | 1,36 | 1,40 | 1,52 |
| 1989 | 2,03 | 2,03 | 2,03 | 2,03 | 2,04 | 2,05 | 2,07 | 2,10 | 2,12 |
| 1990 | 2,24 | 2,24 | 2,24 | 2,26 | 2,27 | 2,26 | 2,27 | 2,36 | 2,38 |
| 1991 | 1,53 | 1,53 | 1,54 | 1,55 | 1,56 | 1,57 | 1,60 | 1,65 | 1,81 |
| 1992 | 1,46 | 1,47 | 1,49 | 1,52 | 1,55 | 1,58 | 1,65 | 1,87 | 1,93 |
| 1993 | 1,02 | 1,03 | 1,04 | 1,06 | 1,09 | 1,12 | 1,18 | 1,33 | 1,42 |
| 1994 | 1,51 | 1,52 | 1,52 | 1,53 | 1,54 | 1,55 | 1,58 | 1,66 | 1,71 |
| 1995 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,32 | 0,33 | 0,35 | 0,39 | 0,50 | 0,54 |
| 1996 | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 1,80 | 1,83 | 1,85 | 1,87 | 2,01 | 2,14 |
| 1997 | 2,41 | 2,41 | 2,41 | 2,41 | 2,42 | 2,49 | 2,71 | 3,04 | 3,34 |
| 1998 | 1,82 | 1,86 | 1,89 | 1,91 | 1,95 | 1,98 | 2,04 | 2,14 | 2,34 |
| 1999 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,60 | 1,72 | 1,82 |
| 2000 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,23 | 1,25 |
| 2001 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,54 |
| 2002 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,70 | 0,72 | 0,74 | 0,84 | 0,97 |
| 2003 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,01 | 1,02 | 1,14 | 1,23 |
| 2004 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,60 | 1,74 |
| 2005 | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,78 | 0,88 | 0,90 | 0,97 | 1,24 | 1,26 |
| 2006 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,96 | 0,97 | 0,98 | 1,09 | 1,55 |
| 2007 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,51 | 0,52 | 0,70 |
| 2008 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,36 | 0,45 |
| 2009 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 1,98 | 2,07 | 2,06 | 2,12 | 2,73 | 3,51 |
| 2010 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,62 | 2,71 | 2,87 | 3,07 |
| 2011 | 1,41 | 1,41 | 1,41 | 1,43 | 1,42 | 1,44 | 1,47 | 1,64 | 1,84 |
| 2012 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,06 | 1,24 | 1,35 |
| 2013 | 2,27 | 2,27 | 2,27 | 2,31 | 2,36 | 2,38 | 2,41 | 2,58 | 2,96 |
| 2014 | 1,14 | 1,14 | 1,15 | 1,19 | 1,20 | 1,22 | 1,24 | 1,35 | 1,38 |
| 2015 | 1,22 | 1,22 | 1,22 | 1,28 | 1,32 | 1,34 | 1,36 | 2,12 | 2,33 |
| 2016 | 0,66 | 0,67 | 0,67 | 0,68 | 0,69 | 0,70 | 0,72 | 0,89 | 0,94 |

2.1. Choix des VCNd représentatifs des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou.

La faible variation des VCNd de différents pas de temps est due principalement à la grande stabilité des périodes d'étiage. Ce que l'on peut observer dans la distribution des débits journaliers à l'échelle annuelle dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (Figure 7-9).

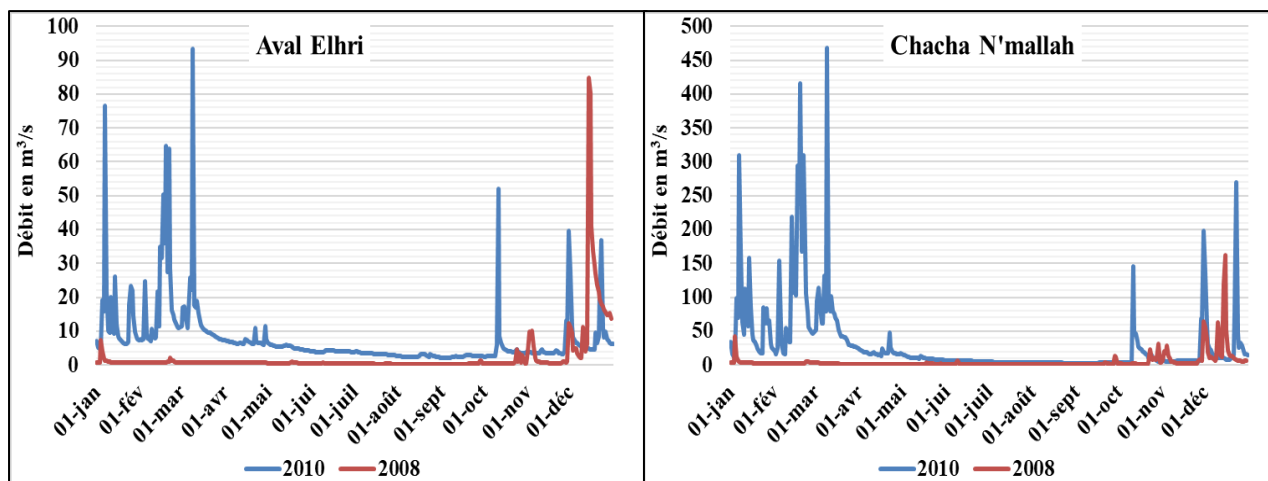


Figure 7-9: Stabilité des débits d'étiages dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou, comparaison entre l'année la plus excédentaire (2010) et l'année la plus déficitaire (2008)

Nous allons réaliser une corrélation entre les différents VCNd de chaque station du bassin versant de l'oued de Srou. Les résultats obtenus montrent que les VCNd sont bien corrélés entre eux, comme présente le tableau (7-6). Cependant, on peut remarquer que certains indices présentent des coefficients de corrélation important, pour certains que d'autres. Nous allons regrouper les VCNd qui présentent un coefficient de corrélation qui dépasse les 90 %.

- Dans la première, on trouve que les VCN1 se corrént bien aux VCN3, VCN5, VCN10, VCN15 et VCN20 ;
- La deuxième, les VCN30 se corrént bien aux VCN10, VCN15 et VCN20 ;
- Alors que dans la troisième, les VCN30 se corrént bien au VCN60 et VCN90.

L'analyse de la variation entre ces classes montre que les VCN1, VCN3 et VCN5 présentent un coefficient de variation très faible, il est de l'ordre de 0,59 % dans la station d'Aval Elhri et de 0,30 % dans la station de Chacha N'mallah. L'écart type entre ces indicateurs ne dépasse pas 0,01.

Tableau 7-6 : Analyse de variation entre les VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou

| Indice | Aval Elhri | | Chacha N'mallah | |
|---------------------|------------|--------|-----------------|--------|
| | σ | Cv | σ | Cv |
| VCN1, VCN3, VCN5 | 0,01 | 0,59 % | 0,00 % | 0,30 % |
| VCN10, VCN15, VCN20 | 0,01 | 0,87 % | 0,02 % | 1,23 % |
| VCN30, VCN60, VCN90 | 0,04 | 3,29 % | 0,15 % | 9,13 % |

Les VCN10, VCN15 et VCN20 présentent une variation légèrement faible entre eux, elle est de l'ordre de 0,87 % en Aval d'Elhri et de 1,23 % au niveau de Chacha N'mallah. La variation est devenue importante entre les VCN30, VCN60 et les VCN90, elle dépasse 9,13% dans la station de Chacha N'mallah et elle est de l'ordre de 3,29 % en Aval d'Elhri.

Sur la base de ces résultats, on va choisir les VCN5, VCN10, VCN30, VCN60 et les VCN90 pour décrire les régimes d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou.

Tableau 7-7 : Corrélations entre les VCNd des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

| Station | Indice | VCN 1 | VCN 3 | VCN 5 | VCN 10 | VCN 15 | VCN 20 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 |
|------------------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Aval Elhri | VCN 1 | 1 | | | | | | | | |
| | VCN 3 | 0,98 | 1 | | | | | | | |
| | VCN 5 | 0,97 | 0,99 | 1 | | | | | | |
| | VCN 10 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 1 | | | | | |
| | VCN 15 | 0,92 | 0,94 | 0,94 | 0,98 | 1 | | | | |
| | VCN 20 | 0,92 | 0,93 | 0,94 | 0,98 | 0,99 | 1 | | | |
| | VCN 30 | 0,87 | 0,88 | 0,89 | 0,92 | 0,93 | 0,93 | 1 | | |
| | VCN 60 | 0,82 | 0,84 | 0,85 | 0,87 | 0,88 | 0,88 | 0,93 | 1 | |
| | VCN 90 | 0,81 | 0,82 | 0,83 | 0,86 | 0,86 | 0,87 | 0,91 | 0,95 | 1 |
| Chacha N' mallah | VCN 1 | 1 | | | | | | | | |
| | VCN 3 | 0,99 | 1 | | | | | | | |
| | VCN 5 | 0,99 | 0,99 | 1 | | | | | | |
| | VCN 10 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 1 | | | | | |
| | VCN 15 | 0,98 | 0,98 | 0,98 | 0,99 | 1 | | | | |
| | VCN 20 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 1 | | | |
| | VCN 30 | 0,94 | 0,94 | 0,95 | 0,96 | 0,96 | 0,97 | 1 | | |
| | VCN 60 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,85 | 0,86 | 0,89 | 1 | |
| | VCN 90 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,81 | 0,82 | 0,85 | 0,92 | 1 |

2.2. Occurrence des VCNd dans le bassin versant de l'oued de Srou

La grande totalité des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou se produit entre les mois de mai et de septembre (Figure 7-10). Au niveau de la station d'Aval Elhri, 56,1% des VCN60 et 46,3% des VCN90 apparaissent en mois de juillet. Alors que 39% des VCN5, VCN10 et des VCN30 se produisent en mois d'août. Dans la station de Chacha N'mallah, la majeure partie des VCN30 (71%), VCN60 (69%) et VCN90 (45%) se produisent en mois de juillet. Alors que pour les VCN5 et les VCN10, la majorité (58 et 56%) se produit en mois d'août.

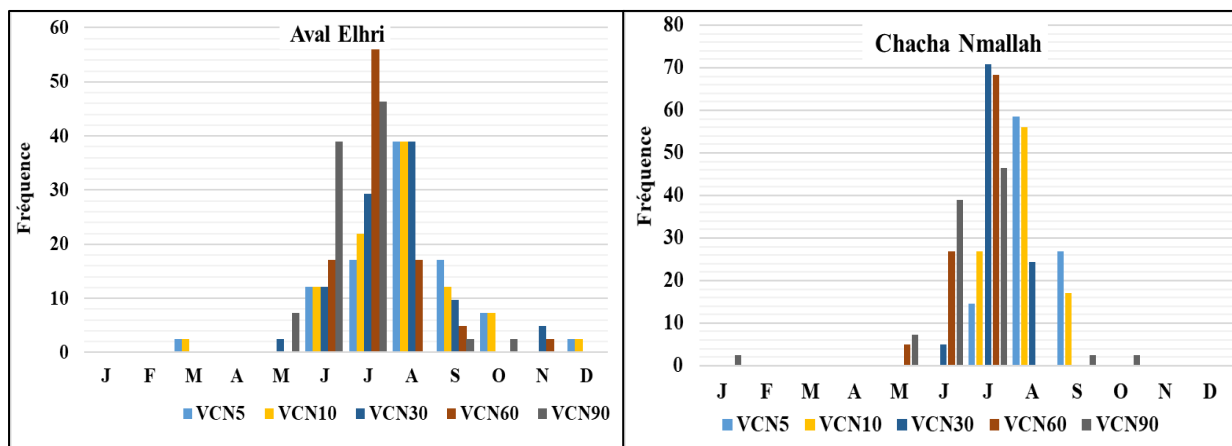


Figure 7-10 : Occurrence des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Des VCNd ont été apparus pendant la phase des hautes eaux. Cette situation est observée dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka, en mois d'octobre des années 1982 et 1993, mars de l'année 2000 et décembre de 2005. La même situation est enregistrée dans la station de Chacha N'mallah avec une faible fréquence en mois de janvier de 1976 et d'octobre de 1994.

2.3. Analyse de la variabilité des VCNd dans le bassin versant de l'oued de Srou

Comme les QMNA, les séries des VCNd des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah présentent une variabilité importante à l'échelle temporelle et spatiale (Figure 7-11).

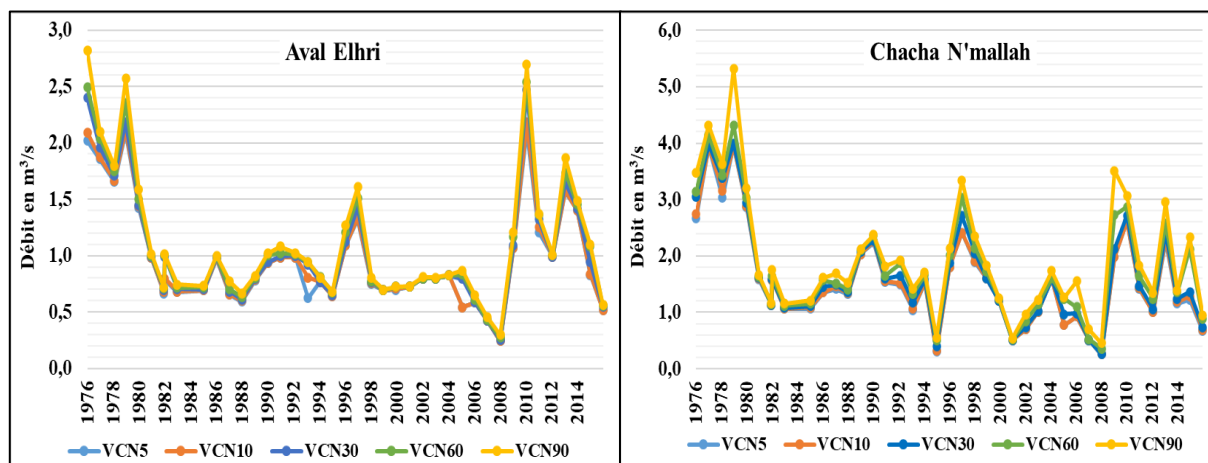


Figure 7-11 : Variation des VCNd dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka en Aval d'Elhri, les Cv des VCNd oscillent entre 48,1% et 50,4%. La variabilité devient importante au niveau de la station de Chacha N'mallah, les Cv dépassent les 54% (Tableau 7-8). L'écart entre les valeurs des VCNd de la station de Chacha N'mallah est plus important que celui de la station d'Aval Elhri. On note aussi que cet écart devient important pendant les années excédentaires de la chronique (1976, 1979, 1996, 2010 et 2013). Les plus importantes valeurs des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou sont observées en 1976, 1978, 2010 et 2013, alors que les plus faibles sont observées en 2008, 2007 et 2016. Pour approfondir cette analyse visuelle nous allons procéder à une analyse des rangs des différentes valeurs des VCNd dans le but de classer les années avec étiage sévère.

Tableau 7-8: Analyse de la variation des VCNd dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| | Aval Elhri | | | | | Chacha N'mallah | | | | |
|---------------------------|------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| | VCN 5 | VCN 10 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 | VCN 5 | VCN 10 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 |
| μ (m ³ /s) | 1,0 | 0,99 | 1,03 | 1,07 | 1,10 | 1,58 | 1,59 | 1,66 | 1,79 | 1,96 |
| σ | 0,5 | 0,48 | 0,5 | 0,52 | 0,55 | 0,86 | 0,87 | 0,9 | 0,94 | 1,07 |
| Cv | 47,1 | 48,1 | 48,5 | 49,1 | 50,4 | 54,9 | 54,9 | 54,4 | 52,5 | 54,6 |

2.4. Analyses des rangs des VCNd

L'analyse des rangs des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou permet d'identifier les étiages les plus sévères. Cette méthode est déjà appliquée par LANG (2007) dans l'analyse des VCNd et des QCNs de la station Gerbéviller en France. Le principe consiste à donner pour chaque valeur son rang dans la série, la plus faible valeur prend le premier rang alors que la plus forte prend le dernier rang. Or, lorsque l'on classe les VCNd, on constate que le rang d'une même année peut varier en fonction de la variable retenue. Cela signifie donc qu'en fonction des VCNd considérés, la fréquence expérimentale d'apparition d'un étiage peut changer. Les résultats sont présentés dans le tableau (7-9).

Les étiages les plus sévères de la chronique d'étude ont été produits dans le bassin versant de l'oued de Srou en 2008. Toutes les faibles valeurs des différents VCNd ont été enregistrées durant cette année. Ce qui est identique aux résultats déjà obtenus pour les QMNA et lors de l'analyse hydrologique.

Les années 2007 et 2016 viennent respectivement en deuxième et troisième position dans le sous bassin de l'oued de Chbouka. En effet, tous les VCND ont le même rang pour la même année. Dans la station de Chacha N'mallah la situation est différente, le classement n'est pas le même pour tous les VCND. Selon les VCN5, VCN10, VCN30 et VCN60, la deuxième année sévère de la chronique est l'année 1995.

La deuxième faible QMNA de la chronique est observée aussi dans cette année. Alors que la deuxième faible valeur du VCN90 est enregistrée en 2001. Cette même année est la troisième année sévère de la chronique selon les autres indices.

La variation dans les rangs des VCND peut en partie être reliée au problème de la durée de l'étiage. Un événement peut en effet être sévère, mais sur une courte durée et donc être peu représentatif d'une situation d'étiage. Au contraire, les débits d'étiage peuvent être moins bas mais sur une durée plus longue et finalement plus pénalisante (LANG, 2007).

Les plus fortes valeurs des VCND de la station de Chacha N'mallah ont été enregistrées en 1976. Dans le Chbouka la forte valeur du VCN10 est enregistrée en 1976 alors que pour les autres indices, les fortes valeurs sont observées en 2010.

Tableau 7-9:Rangs des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Année | Aval Elhri | | | | | Chacha N'mallah | | | | |
|-------|------------|--------|--------|--------|--------|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| | VCN 5 | VCN 10 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 | VCN 5 | VCN 10 | VCN 30 | VCN 60 | VCN 90 |
| 1976 | 41 | 41 | 40 | 39 | 39 | 37 | 37 | 38 | 38 | 37 |
| 1977 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| 1978 | 37 | 37 | 37 | 37 | 36 | 39 | 39 | 39 | 39 | 39 |
| 1979 | 39 | 39 | 39 | 40 | 40 | 41 | 41 | 41 | 41 | 41 |
| 1980 | 35 | 35 | 35 | 34 | 34 | 38 | 38 | 37 | 36 | 35 |
| 1981 | 26 | 26 | 24 | 23 | 25 | 26 | 28 | 27 | 21 | 19 |
| 1982 | 19 | 18 | 27 | 26 | 24 | 25 | 25 | 24 | 22 | 23 |
| 1983 | 10 | 9 | 9 | 9 | 8 | 14 | 14 | 13 | 10 | 8 |
| 1984 | 11 | 10 | 11 | 10 | 12 | 12 | 11 | 11 | 8 | 7 |
| 1985 | 12 | 11 | 10 | 11 | 11 | 13 | 13 | 12 | 11 | 9 |
| 1986 | 25 | 25 | 25 | 22 | 22 | 19 | 19 | 19 | 19 | 18 |
| 1987 | 9 | 8 | 7 | 8 | 13 | 21 | 21 | 21 | 18 | 20 |
| 1988 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 18 | 18 | 17 | 17 | 16 |
| 1989 | 18 | 17 | 17 | 17 | 18 | 32 | 32 | 31 | 29 | 28 |
| 1990 | 24 | 24 | 23 | 25 | 26 | 33 | 33 | 33 | 32 | 32 |
| 1991 | 27 | 27 | 28 | 28 | 28 | 24 | 24 | 25 | 24 | 24 |
| 1992 | 27 | 27 | 29 | 27 | 27 | 22 | 22 | 28 | 27 | 27 |
| 1993 | 7 | 21 | 21 | 21 | 21 | 11 | 12 | 14 | 15 | 15 |
| 1994 | 17 | 16 | 15 | 18 | 15 | 23 | 23 | 22 | 25 | 21 |
| 1995 | 8 | 7 | 6 | 6 | 6 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 1996 | 31 | 31 | 31 | 31 | 31 | 29 | 29 | 29 | 28 | 29 |
| 1997 | 33 | 33 | 34 | 35 | 35 | 35 | 35 | 35 | 37 | 36 |
| 1998 | 16 | 15 | 14 | 14 | 14 | 30 | 30 | 30 | 31 | 31 |
| 1999 | 13 | 12 | 8 | 7 | 7 | 28 | 27 | 26 | 26 | 25 |
| 2000 | 14 | 13 | 12 | 12 | 9 | 16 | 16 | 15 | 12 | 11 |
| 2001 | 15 | 14 | 12 | 12 | 10 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 2002 | 20 | 19 | 18 | 15 | 17 | 6 | 6 | 6 | 5 | 6 |
| 2003 | 20 | 19 | 18 | 15 | 16 | 10 | 10 | 9 | 9 | 10 |
| 2004 | 22 | 22 | 20 | 19 | 19 | 27 | 26 | 23 | 20 | 22 |
| 2005 | 4 | 4 | 16 | 20 | 20 | 7 | 7 | 7 | 14 | 12 |
| 2006 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 8 | 8 | 8 | 7 | 17 |
| 2007 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 2008 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2009 | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 31 | 31 | 32 | 34 | 38 |
| 2010 | 40 | 40 | 41 | 41 | 41 | 36 | 36 | 36 | 35 | 34 |
| 2011 | 32 | 32 | 32 | 32 | 32 | 20 | 20 | 20 | 23 | 26 |
| 2012 | 29 | 29 | 26 | 24 | 23 | 9 | 9 | 10 | 13 | 13 |
| 2013 | 36 | 36 | 36 | 36 | 37 | 34 | 34 | 34 | 33 | 33 |
| 2014 | 34 | 34 | 33 | 33 | 33 | 15 | 15 | 16 | 16 | 14 |
| 2015 | 23 | 23 | 22 | 29 | 29 | 17 | 17 | 18 | 30 | 30 |
| 2016 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 | 5 | 5 | 6 | 5 |

2.5. Analyse fréquentielle des VCND du bassin versant de l'oued de Srou

L'analyse fréquentielle des VCND montre la proportion de temps pendant laquelle un débit est dépassé (ou de manière équivalente l'intervalle moyen en années (« période de retour » ou « intervalle de récurrence ») que la rivière tombe en dessous d'un débit donné).

- *Ajustement des VCND*

De nombreuses études ont examiné quelles distributions de probabilité sont les plus appropriées pour ajuster les VCND dans différentes régions. VOGEL ET WILSON (1996) SMAKHTIN (2001), CATALOGNE (2013) ABI-ZEID ET BOBEE (1999) ont réalisé une synthèse exhaustive des principales lois appliquées aux débits d'étiage (voir la synthèse bibliographique). Les plus fréquemment mentionnées dans la littérature sont : Log-normale, Weibull, Gumbel, et Pearson de type III.

Nous avons testé ces différentes lois sur les séries des VCND des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah et nous avons trouvé que ces débits s'ajustent bien à loi Log-Normal. Les résultats de l'ajustement des VCND sont montrés dans les graphes de la figure (7-12).

Les faibles valeurs de VCND de la chronique d'étude (1976-2016) ont été enregistrées dans la station d'Aval Elhri en 2008 durant les années 2008, 2007, 2016. Les fortes valeurs des VCN5 et VCN10 ont été observées en 1976, alors que les fortes valeurs des VCN30, VCN60 et VCN90 sont produites en 2010. Dans la station de Chacha N'mallah les faibles valeurs de VCN5, VCN10, VCN30 et VCN60 apparaissent respectivement en 2007, 1995 et 2001. Mais pour le VCN90, sa deuxième faible valeur est observée en 2001 alors que la troisième est enregistrée en 1995. Les fortes valeurs des VCND de cette station sont apparues en 1976.

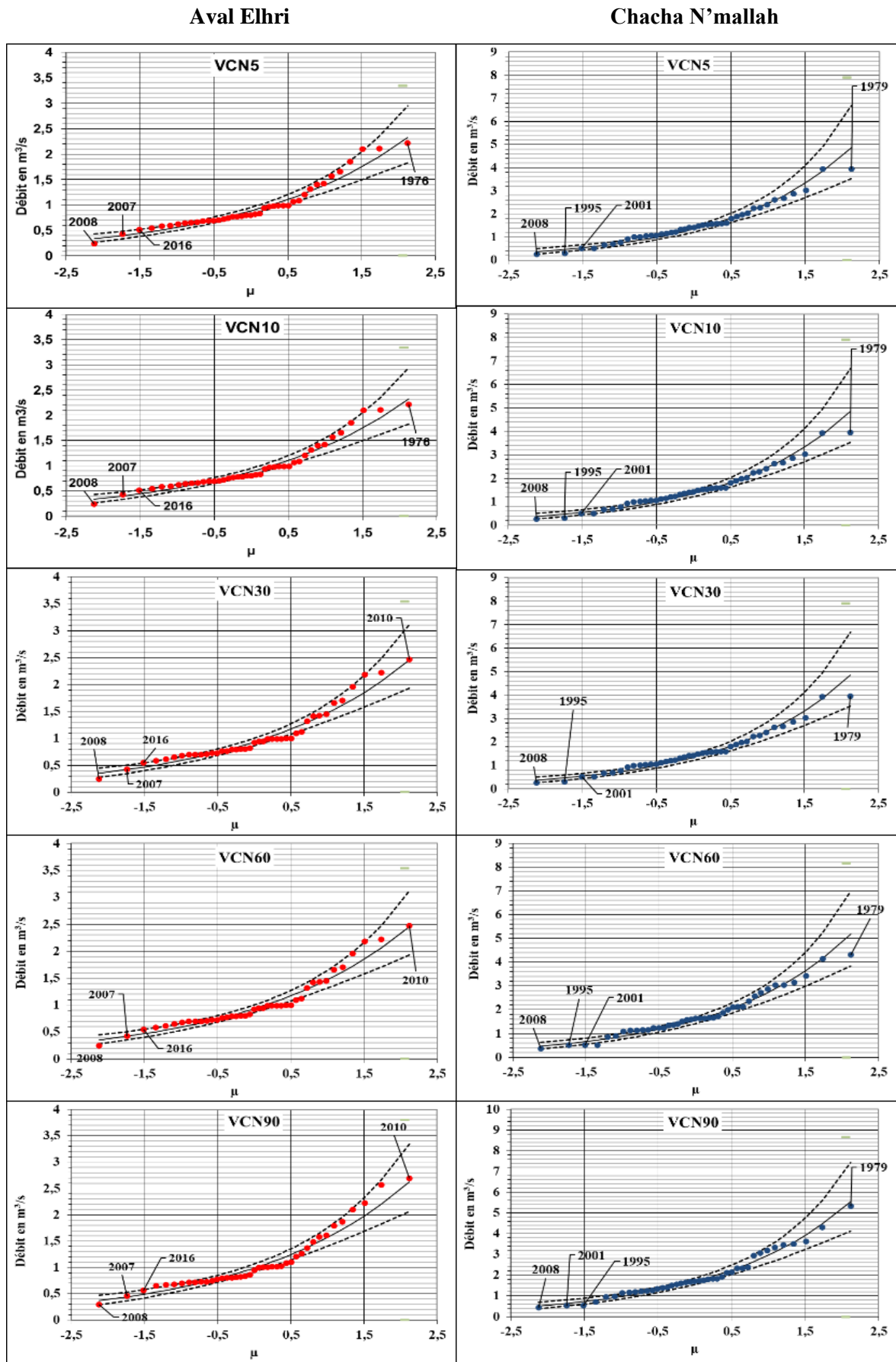


Figure 7-12: Ajustement des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou à la loi Log-normal (1976-2016)

• *Débits fréquents d'étiages*

Nous avons calculé les débits fréquents d'étiage les plus extrêmes soit en VCN5, VCN10, VCN30, VCN60 et VCN90 de durée de retours 2, 5, et 10 ans (Tableau 7-10). Les débits fréquents de la station d'Aval Elhri sont marqués par une faible variabilité entre les différentes périodes de retours. Cette variabilité est plus importante dans la station de Chacha N'mallah. Les rapports entre le débit médian et le débit décennal sont importants dans le bassin versant de l'oued de Srou (varient entre 2,82 et 3,33). Ces rapports montrent l'importance du soutien de la nappe karstique au niveau du sous bassin de l'oued de Chbouka.

Tableau 7-10 : Fréquences d'apparition des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Station | Fréquence | Période de retour | VCN5 (m ³ /s) | VCN10 (m ³ /s) | VCN30 (m ³ /s) | VCN60 (m ³ /s) | VCN90 (m ³ /s) |
|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Aval Elhri | 1/2 | 2 ans | 0,979 | 0,991 | 1,032 | 1,065 | 1,100 |
| | 1/5 | 5 ans | 0,583 | 0,590 | 0,610 | 0,625 | 0,634 |
| | 1/10 | 10 ans | 0,376 | 0,381 | 0,390 | 0,395 | 0,390 |
| | Q médian/ Q décennal | | 2,61 | 2,61 | 2,60 | 2,64 | 2,69 |
| Chacha N'mallah | 1/2 | 2 ans | 1,575 | 1,591 | 1,658 | 1,794 | 1,958 |
| | 1/5 | 5 ans | 0,846 | 0,856 | 0,899 | 1,001 | 1,059 |
| | 1/10 | 10 ans | 0,465 | 0,472 | 0,502 | 0,586 | 0,589 |
| | Q médian/ Q décennal | | 3,39 | 3,39 | 3,37 | 3,30 | 3,06 |

Les étiages les plus extrêmes de la chronique d'étude de 2008 se produisent au moins une fois tous les 108 ans.

2.6. Utilité des VCNd pour les gestionnaires

Comme nous l'avons dit au début les VCNd permet d'identifier les débits d'étiage à différents pas de temps afin de limiter l'influence des précipitations sur les écoulements. Dans ce contexte climatique semi-aride, les VCNd ne changent pas sur des longues périodes. Donc, le recours à des VCNd de longues durées serai représentatifs des situations d'étiages au Maroc, parce que les débits pendant les phases des basses eaux.

Axe 18 : Comparaison entre les VCN30 et les QMNA du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Nous avons remarqué que les valeurs des QMNA et des VCN30 se ressemblent même parfois identiques dans la plupart des années d'observations. Nous avons posé la question : est-ce que ces valeurs présentent les mêmes situations même si sont issus à des pas de temps différents ?

1. QMNA et VCN30 proches mais pas identique dans le temps

Rappelons du problème que pose le QMNA pour les gestionnaires dans les pays qui ont un climat humide, dont le débit des cours d'eau varie énormément en fonction du temps, c'est qu'il représente le débit moyen minimal du mois calendaire, et ceci peut être moins représentatif d'un comportement d'étiage. En effet, Les débits d'étiage peuvent en effet être observés durant une période chevauchant deux mois, induisant une surestimation du débit d'étiage par le QMNA. Alors que les VCN30 représente le débit moyen mobil sur 30 jours consécutif et ne pourra pas être forcément superposable avec le mois calendaire (Figure 7-13).

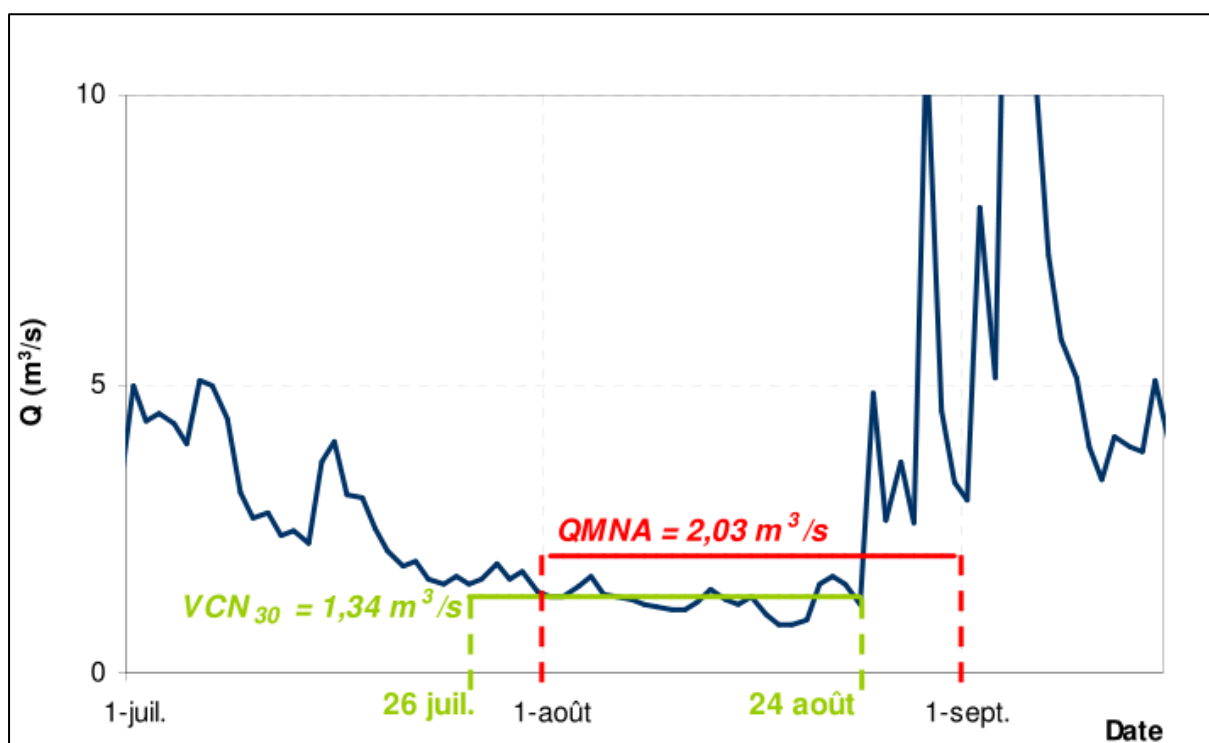


Figure 7-13: Illustration de la contrainte de l'échelle calendaire associée au QMNA (LANG, 2007).

Nous allons donc comparer ces deux indices, dans le but déterminer si ces deux variables sont proches vraiment dans notre contexte climatique semi-aride, caractériser par une grande stabilité des débits en périodes des basses eaux tout en analysant le comportement de leurs variabilités à l'échelle spatio-temporelle. Une corrélation entre ces deux indices sera réalisée

dans le but de déterminer si ces deux paramètres se rassemblent ou se diffèrent dans le contexte hydro-climatique du Maroc et en particulier dans le bassin versant de l'oued de Srou.

2. Variabilité annuelle des QMNA et des VCN30 dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Les débits d'étiages (QMNA et les VCN30) varient d'une façon similaire dans les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou avec quelques légères exceptions (Figure 7-14).

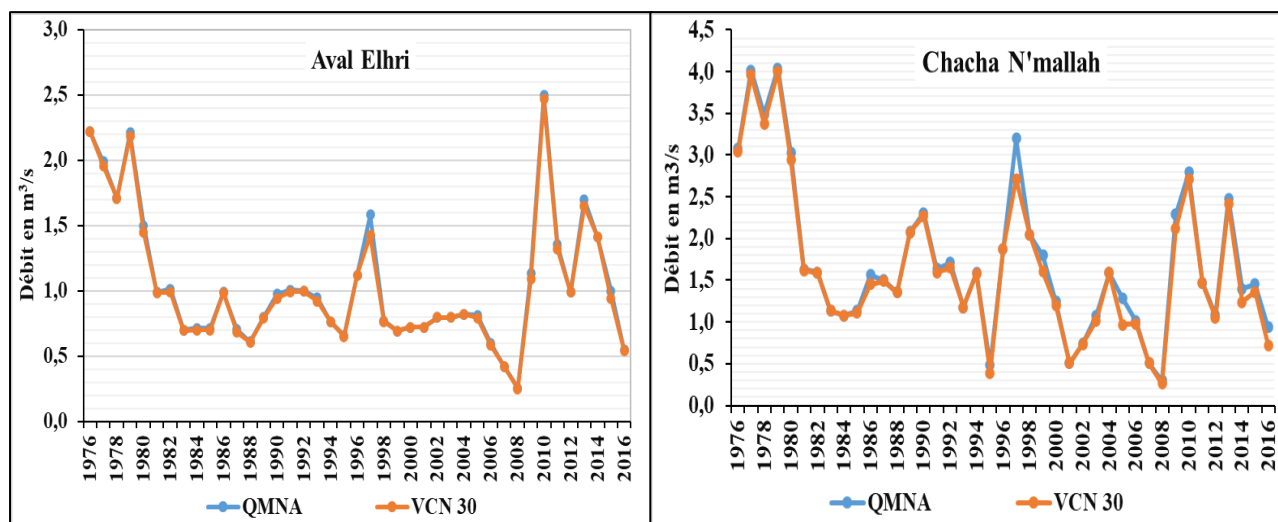


Figure 7-14: Variation annuelle des QMNA et des VCN30 dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

Au niveau de la station d'Aval Elhri, la variabilité des VCN30 et des QMNA sur la chronique 1976-2016 est moins importante que celle de Chacha N'mallah. Le coefficient de variation des deux indices dans le Chbouka est de l'ordre de 48,6%. Les valeurs maximales se situent dans l'année 2010, elles atteignent $2,47 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit minimal de la chronique est observé en 2008, il est de l'ordre de $0,25 \text{ m}^3/\text{s}$. La moyenne de la chronique est de l'ordre de $1,03 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tableau 7-11).

Dans la station de Chacha N'mallah la variabilité des débits d'étiages est très importante. Le coefficient de variation est de l'ordre de 54%. Les valeurs minimales sont de l'ordre de $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistrées en 2008, les max sont de l'ordre de $4,04 \text{ m}^3/\text{s}$ observées en 1979. Une différence entre les VCN30 et les QMNA est observée pendant les années humides : 1995, 2005 et 2013.

Tableau 7-11: Paramètres de la variation des VCN30 et des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| | Aval Elhri | | Chacha N'mallah | |
|---------------------------|------------|-------|-----------------|-------|
| | QMNA | VCN30 | QMNA | VCN30 |
| μ (m ³ /s) | 1,05 | 1,03 | 1,72 | 1,66 |
| σ | 0,51 | 0,50 | 0,92 | 0,90 |
| Cv | 48,61 | 48,52 | 53,36 | 54,41 |

Généralement, l'écart entre les débits d'étiages des deux stations tend vers la diminution. L'écart moyen entre les débits d'étiages de la station d'aval Elhri et la station de Chacha N'mallah est de 0,67 m³/s. Il devient important dans les années humide, 2,03 m³/s en 1977, mais pendant les années sèches il devient faible, il n'a pas dépassé 0,04 m³/s en 2008. Cette différence d'écart est expliquée par le fait qu'au début de la chronique les apports de l'oued de Srou sont importants en période d'étiage. Alors que la diminution de l'écart après l'an 2000 est expliquée par le fait que le soutien des débits d'étiage est assuré seulement par les débits de l'oued de Chbouka vers la fin des années 2000.

3. Corrélation entre les VCN30 et les QMNA du bassin versant de l'oued Srou (1976-2016)

Nous allons effectuer la corrélation entre les VCN30 et les QMNA de Chaque station du bassin versant de l'oued de Srou sur la chronique d'étude. L'objectif est de mettre en évidence le degré de ressemblance entre ces deux indicateurs. La figure (7-15) présente les résultats de la corrélation entre les QMNA et les VCN30 pour les deux stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah.

Les résultats de la corrélation entre les QMNA et les VCN30 dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou montrent très peu d'écart. Dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka, le coefficient de corrélation est de l'ordre de 0,99 avec un écart moyen de 0,017 m³/s entre les QMNA et les VCN30. La différence maximale est 0,15 m³/s enregistrée en 1997. Dans la station de Chacha N'mallah, l'écart devient un peu important, le coefficient de corrélation

est 0,98. L'écart maximal est de 1,69 m³/s enregistré le 1997. Les QMNA s'éloignent des VCN30 avec une moyenne de 0,6 m³/s.

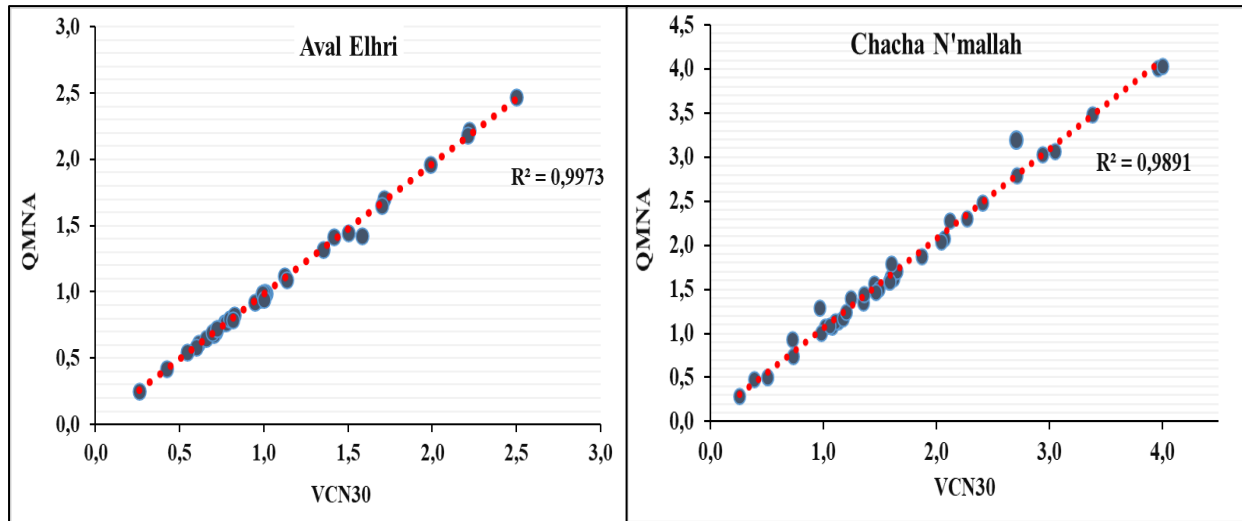


Figure 7-15:Corrélation entre les QMNA et les VCN30 des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)

LANG (2007) montre que l'écart dans la corrélation entre les VCN30 et QMNA est en étroite relation avec la nature géologique du substratum. Pour les bassins versants à substratum perméable, l'écart de corrélation est faible, ce qui s'explique par la forte inertie liée à la nappe qui génère des écoulements pondérés. En revanche, les bassins versants imperméables génèrent une importante réactivité aux précipitations expliquant des écarts importants entre ces deux grandeurs d'étiages, notamment dans le cas d'été très arrosé.

En générale et malgré la petite différence observée dans la station de Chacha N'mallah, les résultats obtenus montrent l'importance du substratum perméable et l'apport de la nappe du Moyen-Atlas. Cette dernière assure une alimentation continue des deux cours d'eau du bassin ; l'oued de Chbouka et l'oued de Srou.

Axe 19 : Les DC comme outil de caractérisation des débits d'étiages à l'échelle journalière.

Dans cet axe nous allons essayer d'identifier les débits d'étiage tout en se basant sur les la courbe des débits classés (DC). Nous allons définir cette courbe, les méthodes d'extraction ainsi les domaines d'utilisation des DC. Ensuite, nous allons identifier les débits d'étiages à partir de la courbe des débits classés des deux stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la période d'étude de 1976 à 2016.

1. Définition

La courbe des DC est une signature hydrologique importante. Elle permet de représenter sur un seul graphique l'ensemble des valeurs qui peuvent être prise par les débits à un exutoire, de la plus forte en crue à la plus faible en étiage. En outre, elle renseigne sur la fréquence de dépassement associée à chaque valeur de débits (GARCIA, 2016). Il s'agit d'une relation entre une valeur de débit donnée et le pourcentage de temps pendant lequel ce débit est égalé ou dépassé, ou en d'autres termes, la relation entre l'ampleur et la fréquence des débits d'écoulement.

2. Méthodes de construction de la courbe des DC

Une courbe des débits classés (DC) est l'une des méthodes les plus informatives pour afficher la gamme complète. La méthode de construction de la courbe de DC est basée sur le rassemblement des valeurs de séries chronologiques des débits par ordre décroissant de grandeur, en attribuant des valeurs des débits à des intervalles de classe et en comptant le nombre d'occurrences (pas de temps) dans chaque intervalle de classe. Les fréquences de classe cumulées sont ensuite calculées et exprimées en pourcentage du nombre total de pas de temps dans la période d'enregistrement. Enfin, la limite inférieure de chaque intervalle de classe de débit est tracée par rapport aux points de pourcentage. Alternativement, tous les débits classés sont tracés par rapport à leur rang qui est à nouveau exprimé en pourcentage du nombre total de pas de temps dans l'enregistrement (SMAKHTIN, 2001).

La courbe des DC peut être construite en utilisant différentes résolutions temporelles des données de débit : annuelle, mensuelle ou journalière. Les courbes de DC construites sur la base de séries chronologiques de débit journalier fournissent la manière la plus détaillée d'examiner les caractéristiques du débit d'une rivière.

Deux méthodes permettent de déterminer les DC. La méthode de construction de la courbe DC fondée sur l'échantillon entier (Figure 7-16) et la méthode qui permet la construction des

courbes annuelles des débits classés (Figure 7-17), à partir desquelles des statistiques peuvent être estimées (VOGEL ET AL., 1995).

Le principe de la réalisation de la CDC se résume en un classement des débits journaliers observés sur les n années (comptant N valeurs) par ordre décroissant. Pour un débit Q , la fréquence annuelle est donnée par le rapport $X/(N/365)$, la grandeur X correspond au nombre de jours pendant les n années où ce débit Q a été dépassé (c.a.d. le rang).

On choisit de représenter le nombre de jours durant lesquels la valeur du débit moyen journalier Q en ordonnée a été atteinte ou dépassée.

| | |
|--------------------|--|
| $fr = \frac{r}{N}$ | <ul style="list-style-type: none"> - fr : fréquence annuelle (en nombre de jours), - r : rang, - N : Nombre de données de débits moyens journaliers. |
|--------------------|--|

- Etape 1 : Nombre de données de débits moyens journaliers.
- Etape 2 : Classer les données par ordre décroissant et donner un rang r à chaque valeur.
- Etape 3 : Calcul de la fréquence annuelle pour chaque débit Q .

Pour la méthode de la construction des courbes annuelles des débits classés, le même principe de la méthode précédente est appliqué, sauf ici on travaille seulement avec les débits journaliers de chaque année. En effet, pour chacune des n années d'observation, on réalise une courbe annuelle des débits classés. Les DC globaux de la période sont ensuite obtenus en calculant pour chaque fréquence (jour de dépassement), la moyenne des débits des n courbes annuelles. Les courbes peuvent également être construites en utilisant d'autres intervalles de temps, par exemple à partir de séries chronologiques de débit moyen mobile sur n jours ou n mois. Nombreux auteurs ont fourni des détails sur la construction et l'interprétation des CDC (par exemple SEARCY, 1959 ; INSTITUTE OF HYDROLOGY, 1980 ; MCMAHON ET MEIN, 1986).

Les débits peuvent être aussi exprimés en unités de débit divisés par unité de surface du bassin versant (débits spécifiques). Une telle normalisation facilite la comparaison entre différents bassins versants, car elle réduit les différences dans les CDC. Par conséquent, les effets d'autres facteurs sur la forme des CDC (aridité, géologie et facteurs anthropiques) peuvent être inspectés.

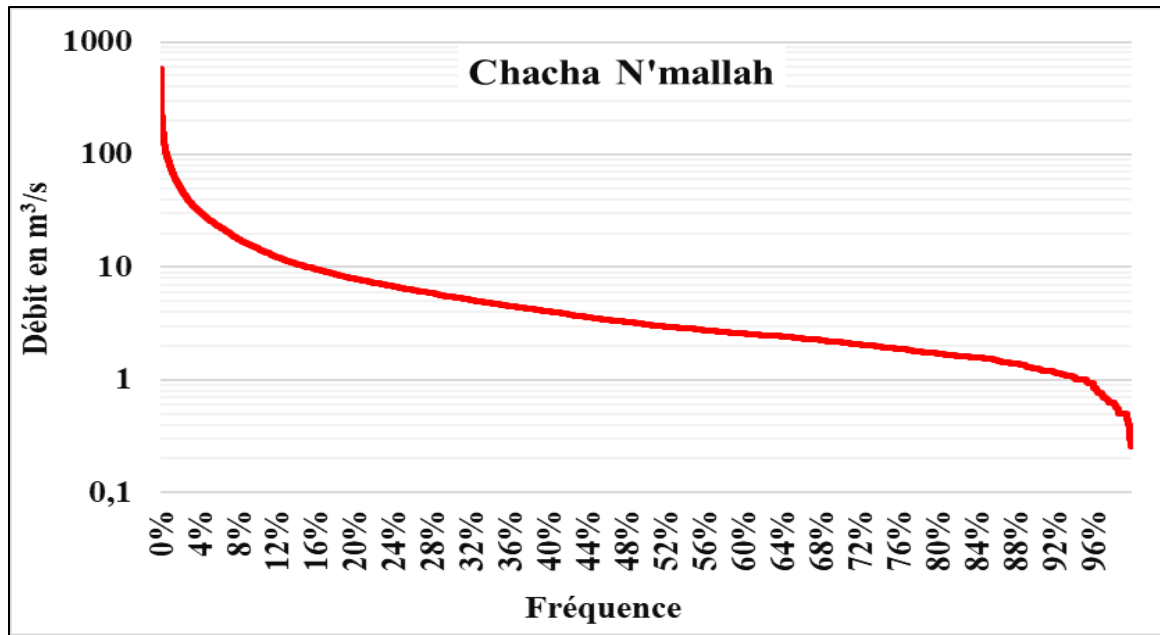


Figure 7-16 : Courbe des débits classés de la station de Chacha N'mallah pour la période complète (1976-2016)

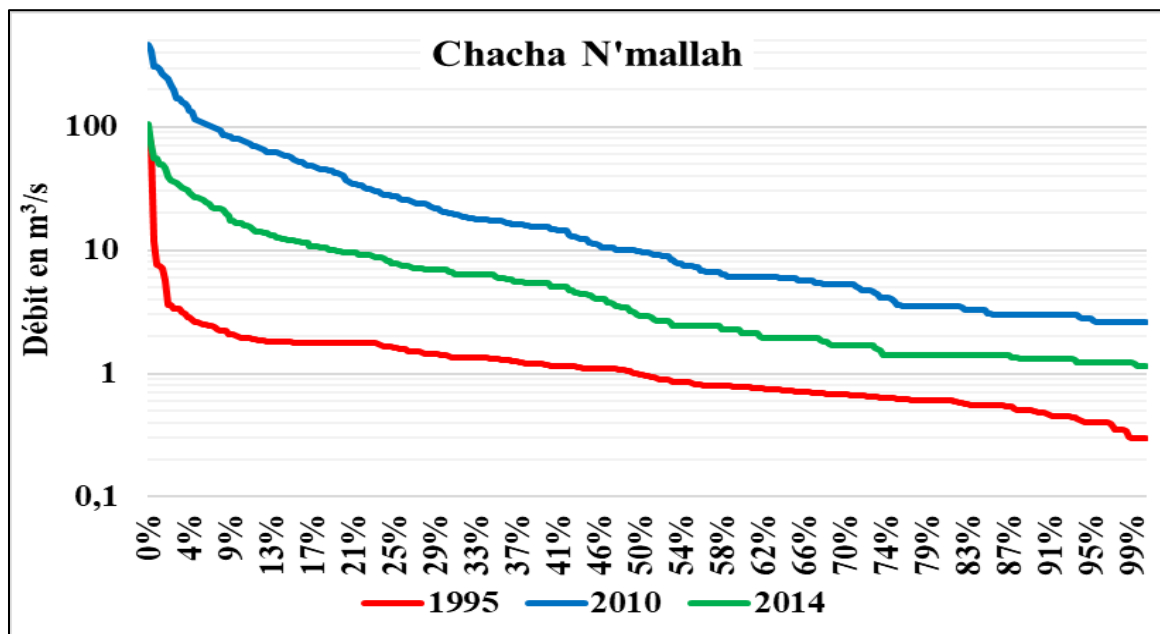


Figure 7-16 : Exemple des courbes des débits classés annuelles pour la station de Chacha N'mallah

La forme des CDC dépend des erreurs hydrométriques et de la période d'enregistrement particulière sur laquelle il est basé. Cela a été directement ou indirectement illustré par SEARCY (1959), VOGEL ET FENNESSEY (1994), HUGHES ET SMAKHTIN (1996), MNGODO (1997) ET SMAKHTIN ET AL. (1997).

Le DC de la période d'enregistrement représente la variabilité et la probabilité de dépassement du débit au cours de la période disponible (ou sélectionnée). Si la période d'enregistrement est suffisamment longue, cette interprétation est appropriée, puisque le DC se rapproche d'une distribution de débit cumulée « limitante ». VOGEL ET FENNESSEY (1994) ont suggéré une interprétation différente d'un DC. Il considère les DC pour des années individuelles et traite ces DC annuels de la même manière qu'une séquence de maxima ou minima de débit annuel. Cette interprétation permet d'estimer les DC moyens et médians. Ces courbes représentent la probabilité de dépassement de débit au cours d'une année typique et se sont avérées moins sensibles à la durée de la période d'enregistrement, en particulier dans le domaine des faibles débits. Cette approche permet également d'attribuer des intervalles de confiance et des périodes de retour aux DC.

3. Domaine d'utilisation des DC

Les DC sont largement utilisés dans la pratique hydrologique (Tableau 7-12). L'utilisation la plus intéressante pour les DC réside dans la détermination des débits des étiages.

Ces débits peuvent être arbitrairement déterminés à partir de la courbe DC avec des débits inférieurs au débit médian (qui correspond au débit égal ou dépassé 50 % du temps Q_{50}). Cette section entière de la courbe peut être interprétée comme un indice de la contribution des eaux souterraines dans l'écoulement du bassin versant (SMAKHTIN, 2001). Si la pente de la partie des étiages du DC est faible, la contribution des eaux souterraines est normalement importante et les débits d'étiages sont durables. Une courbe raide indique une contribution de débit de base faible et variable. En ce sens, la forme de la courbe DC est une indication des conditions hydrogéologiques dans le bassin versant.

Divers indices d'étiages peuvent être estimés à partir de cette partie de la courbe du DC. Les grandeurs issues de la courbe des débits classés sont appelées débits caractéristiques (ou débits fréquentiels). On recense :

- Le Débit Caractéristique d'Etiage (ou DCE ou Q_{97}), qui correspond au débit égalé ou dépassé 355 jours par an ;
- Les Débits Caractéristiques de durées 11, 9 et 6 mois : DC_{11} (ou Q_{90}), DC_9 (ou Q_{75}) et DC_6 (ou Q_{50}), débits dépassés respectivement 335, 274 et 182 jours dans l'année.
- L'étiage absolu (ou minimum absolu), qui ne passe pas nécessairement par la courbe des débits classés, mais se fonde de la même manière sur tous les débits moyens journaliers disponibles car il représente le plus bas débit connu d'un cours d'eau.

Tableau 7-12: Domaine d'utilisation des DC dans le monde (Smakhtin, 2001)

| Auteurs | Domaine d'utilisation des DC |
|---|---|
| SEARCY (1959) | Synthèse des domaines d'application des DC |
| WARNICK (1984) | Etudes de la faisabilité de l'hydroélectricité |
| MALE ET OGAWA (1984) | Evaluation de la capacité des usines de traitement des eaux usées, y compris le débit, la durée du débit, les exigences de qualité de l'eau et les coûts |
| ALAOUZE (1989, 1991) | Estimation des rejets optimal à partir des réservoirs des stations d'épurations, |
| PITMAN (1993) ET MALLORY ET MCKENZIE (1993) | Conception des détournements de l'écoulement |
| ESTES ET OSBORN (1986) ET GORDON ET AL., (1992) | Evaluation des habitats fluviaux dans l'estimation des besoins de débit réservé. |
| HUGHES ET SMAKHTIN (1996) | L'extension des séries chronologiques des débits journaliers observés et la génération de séries chronologiques de débits aux sites non jaugés |
| SMAKHTIN ET AL., 1997 | La restauration des séquences naturelles d'écoulement fluvial dans les rivières régulée |
| PIRT ET SIMPSON, 1983 ; GUSTARD ET AL., 1992 ; DWAF, 1995 ; MHANGO ET JOY, 1998 | Indiquer le pourcentage de temps pendant lequel divers niveaux de pollution de l'eau se produisent après l'introduction d'un polluant d'un volume et d'une intensité donnés dans un cours d'eau |
| VOGEL ET FENNESSEY (1995). | Une synthèse sur les applications possibles des DC dans la pratique de l'ingénierie, la gestion des ressources en eau et la gestion de la qualité de l'eau |

4. Résultats et interprétations

Nous allons appliquer les deux méthodes de construction des DC, et on va extraire et comparer les DC issus.

4.1. DC du bassin versant de l'oued de Srou issu de la méthode globale sur la longue période

L'application de la méthode aux données des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah sur la chronique (1976-2016) a permis d'extraire les débits classés des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah présentée dans la figure (7-18).

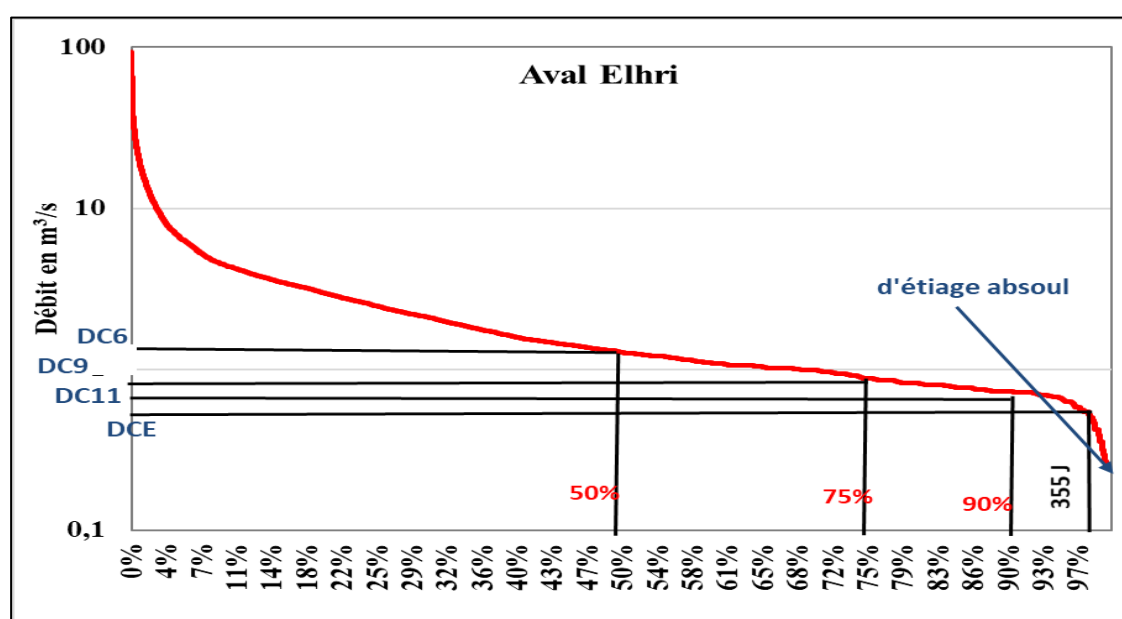


Figure 7-17 : Présentation des différents débits classés des stations d'Aval Elhri pour la période 1976-2016

Les résultats de cette méthode sont présentés dans le tableau (7-13). L'analyse de ces valeurs montre que 50 % des débits de la station d'Aval Elhri sont en dessous de $1,28 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que dans la station de Chacha N'mallah 50 % des débits sont inférieurs à $2,92 \text{ m}^3/\text{s}$. Le plus faible débit observé dans la station d'Aval Elhri est de l'ordre $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que dans la station de Chacha N'mallah il est de l'ordre de $0,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Ceci montre que pendant les phases d'étiages sévères, les débits de l'oued de Chbouka participent avec 93% du débit de la station de Chacha N'mallah.

La variation des débits caractéristiques est très importante dans la station de Chacha N'mallah ($C_v = 59\%$). Cette variation diminue dans la station d'Aval Elhri ($C_v = 40\%$). Ce qui

indique que les débits dans cette station sont plus réguliers et stables que les débits de la station de Chacha N'mallah.

Tableau 7-13: Les débits caractéristiques dans le bassin du Srou (1976-2016)

| Stations | Q ₅₀ (m ³ /s) | Q ₇₀ (m ³ /s) | Q ₇₅ (m ³ /s) | Q ₈₀ (m ³ /s) | Q ₈₅ (m ³ /s) | Q ₉₀ (m ³ /s) | Q ₉₅ (m ³ /s) | DCE (m ³ /s) | EA (m ³ /s) |
|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|----------------------------|---------------------------|
| Aval Elhri | 1,30 | 0,99 | 0,90 | 0,824 | 0,77 | 0,73 | 0,68 | 0,61 | 0,244 |
| Chacha N'mallah | 2,95 | 2,08 | 1,89 | 1,67 | 1,53 | 1,26 | 1,01 | 0,77 | 0,256 |

- **Inertie de l'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou**

L'inertie de l'étiage est évaluée à l'aide de l'indice Q_b, indice défini par NATHAN ET MCMAHON (1990). Celui-ci correspond au ratio des quantiles 90 et 50 des débits classés :

$$Q_b = Q_{90}/Q_{50}$$

Cet indicateur permet d'évaluer la dynamique de l'écoulement souterrain sur les bassins et notamment si cette dynamique joue un rôle de soutien lors des périodes d'étiage.

Tableau 7-14: Calcul de Q_b pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Station | Q ₉₀ | Q ₅₀ | Q ₉₀ /Q ₅₀ |
|------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
| Aval Elhri | 0,73 | 1,30 | 0,56 |
| Chacha N'mallah | 1,26 | 2,95 | 0,43 |

Nous remarquons que pour le sous bassin versant de l'oued de Chbouka à la station d'Aval Elhri est bien soutenu en période d'étiages que le bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha n'mallah.

- **Saisonnalité des étiages du bassin versant de l'oued de Srou**

Un premier indicateur pour étudier la saisonnalité est le Ratio Saisonnier (SR) proposé par LAAHA ET BLÖSCHL (2006). Il est défini par le rapport entre le quantile 95 des débits classés moyens journaliers sur la période estivale (du 22 juin au 21 septembre) et le quantile 95 des débits classés moyens journaliers sur la période hivernale (du 22 décembre au 21 mars) :

$$SR = \frac{Q_{95\text{été}}}{Q_{95\text{hiver}}}$$

Les résultats sont présentés dans le tableau (7-15). Un Ratio Saisonnier inférieur à 1 correspond à un étiage qui a lieu en période estivale, ce qui est le cas pour les deux stations du

bassin versant de l'oued de Srou. On note que pour les bassins niveaux ce Ratio Saisonnier est généralement supérieur à 1, ce qui correspond à un étiage principalement en période hivernale dû au stockage des précipitations sous forme de neige.

Tableau 7-15: Calcul de l'indice Qb pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou

| Station | Q ₉₅ hiver | Q ₉₅ été | SR |
|-----------------|-----------------------|---------------------|------|
| Aval Elhri | 1,16 | 0,73 | 0,63 |
| Chacha N'mallah | 1,97 | 0,63 | 0,32 |

4.2. DC issus de la méthode de la moyenne des courbes annuelles.

Les courbes des débits classés de la station d'Aval Elhri sont caractérisées par une faible pente. Ce qui indique que les débits sont stables sur une longue période. Cette stabilité est due à l'impact du substratum perméable de la partie amont du sous bassin, qui garantit un écoulement stable est permanent.

Si on compare les débits classés de chaque année aux modules interannuels de la station, on trouve que : seulement 1 % des débits classés de l'année humide sont en dessous du module interannuel. L'année moyenne a enregistré plus de 85% des débits en dessous du module. Pour l'année sèche, 99 % des débits sont sous le module. Notant que plus de 73 % des débits de l'année moyenne sont en dessous des débits de l'année sèche. Ce qui montre que les débits caractéristiques d'étiages de l'année 2008 sont plus faibles que les débits de l'année la plus sèche 2007 (Figure 7-19).

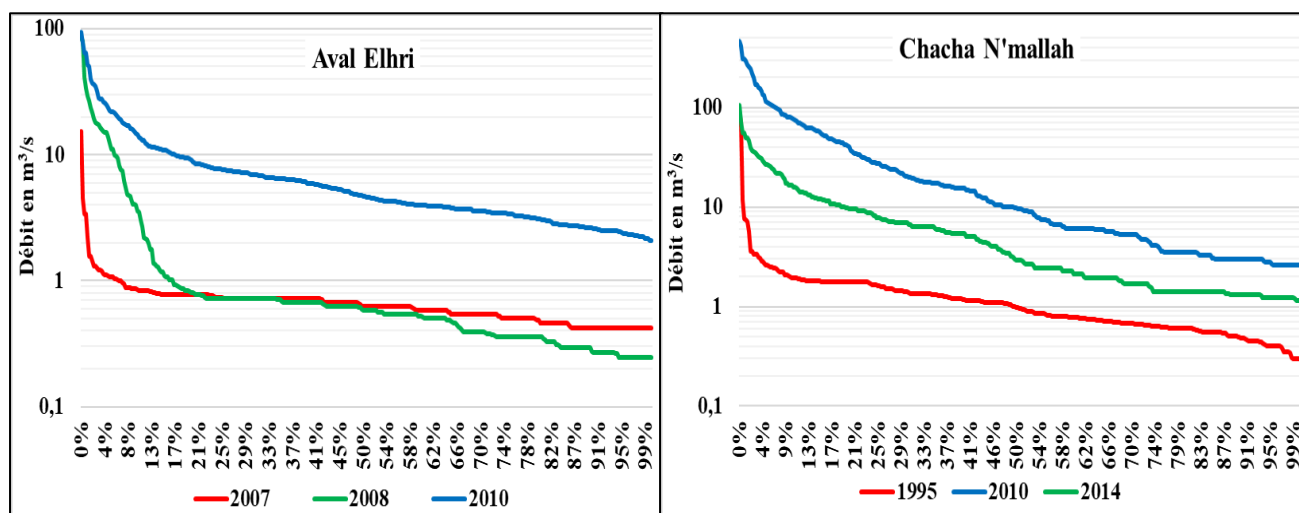


Figure 7-18 : Courbe des débits classés des années humides (bleu), années moyennes (vert) et des années sèches (rouges) des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah

Dans la station de Chacha N'mallah, les courbes des débits classés présentent une pente forte par rapport à celle de la station d'Aval Elhri. Ce qui montre que ces débits sont fortement influencés par les ruissellements superficiels. Seulement 50 % des débits de l'année humide sont inférieurs au module. Pour l'année moyenne, 75% des débits sont en dessous du module, alors que pour l'année la plus sèche on trouve 99% des débits de l'année sont sous le module.

Les plus fortes valeurs de débit ne présentent qu'une faible fréquence alors que les faibles débits ont des fréquences élevées. Ce qui conduit à l'apparition des crues ainsi à l'installation des longues périodes d'étiages dans le bassin versant.

Tableau 7-16 : Le moyen des débits classés annuels de la chronique (1976-2016) des stations du bassin versant de l'oued de Srou

| Stations | Q ₅₀ m ³ /s | Q ₇₀ m ³ /s | Q ₇₅ m ³ /s | Q ₈₀ m ³ /s | Q ₈₅ m ³ /s | Q ₉₀ m ³ /s | Q ₉₅ m ³ /s | DCE m ³ /s | EA m ³ /s |
|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Aval Elhri | 1,54 | 1,17 | 1,13 | 1,08 | 1,03 | 1,01 | 0,97 | 0,95 | 0,92 |
| Chacha N'mallah | 3,76 | 2,45 | 2,27 | 2,05 | 1,9 | 1,78 | 1,67 | 1,64 | 1,58 |

Généralement, les valeurs obtenues par cette méthode sont élevées par rapport à celles obtenues par la moyenne globale (Tableau 7-16).

4.3. Analyse fréquentielle des débits classés annuels du bassin versant de l'oued de Srou

L'objectif de l'analyse fréquentielle des DC est de déterminer le caractère plus au moins exceptionnel d'un étiage. Nous allons se limiter dans cette étude sur les Q₇₅, Q₈₀, Q₉₀ et le DCE.

- **Test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov**

On a appliqué le test de Kolmogorov-Smirnov pour déterminer si les valeurs des DC des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah suivent bien la loi Log-normal. Le principe est de calculer la distance maximale entre la fonction théorique (F) et la fonction empirique (F'). Ce test est donc beaucoup plus sensible à l'existence de points aberrants dans un échantillon. Son avantage par rapport au test χ^2 est qu'il est adapté aux fonctions continues (GAILLEZ, 2013).

- L'hypothèse nulle est H₀ : la loi de proba a la même fonction de répartition F qu'une loi continue donnée.
- L'idée est que, si l'hypothèse nulle H₀ est vraie, la fonction de répartition empirique F' de l'échantillon doit être "proche" (en un sens qui va être précisé) de F.

On mesure l'adéquation de la fonction F' à la fonction F au moyen d'une distance particulière dite $D_{s,k}$, qui est la distance de la norme uniforme entre fonctions de répartition. Graphiquement, c'est le plus grand écart vertical en valeur absolue entre la valeur empirique et

la valeur théorique. Pour obtenir cette distance, on calcule la différence entre F' et F aux points X_i et on cherche le maximum selon la formule :

$$D_{s,k}(F, F') = \text{Max } |F(x) - F'(x)|$$

Etant donné que la p-value calculée est supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$, pour l'ensemble des DC des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah, on accepte effectivement l'hypothèse nulle H_0 .

Ce test prouve l'adéquation entre l'ajustement et les données mais ne permettent nullement de tirer une conclusion sur le choix de la loi.

Tableau 7-17: Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 5% pour décider si la distribution de l'échantillon est en adéquation avec la loi Log-normale pour les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1978-2016).

| | Aval Elhri | | | | Chacha N'mallah | | | |
|-----------|------------|-------|-------|-------|-----------------|-------|-------|-------|
| | Q75 | Q80 | Q90 | DCE | Q75 | Q80 | Q90 | DCE |
| $D_{k,s}$ | 0,158 | 0,145 | 0,130 | 0,128 | 0,074 | 0,095 | 0,100 | 0,126 |
| p | 0,259 | 0,349 | 0,482 | 0,508 | 0,972 | 0,843 | 0,792 | 0,525 |
| α | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 |

• **Contrôle visuel de l'ajustement**

La méthode graphique est la façon la plus efficace pour visualiser la série de données et vérifier si les distributions ajustées apparaissent en accord avec les données (Meylan et al., 2008). En effet, plusieurs distributions peuvent fournir des ajustements statistiquement acceptables. Dans ce cas, les tests de validité de l'ajustement ne permettent pas d'identifier la meilleure distribution à utiliser. Le contrôle visuel de l'ajustement n'est pas un test au sens statistique du terme. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision (Figure 7-20).

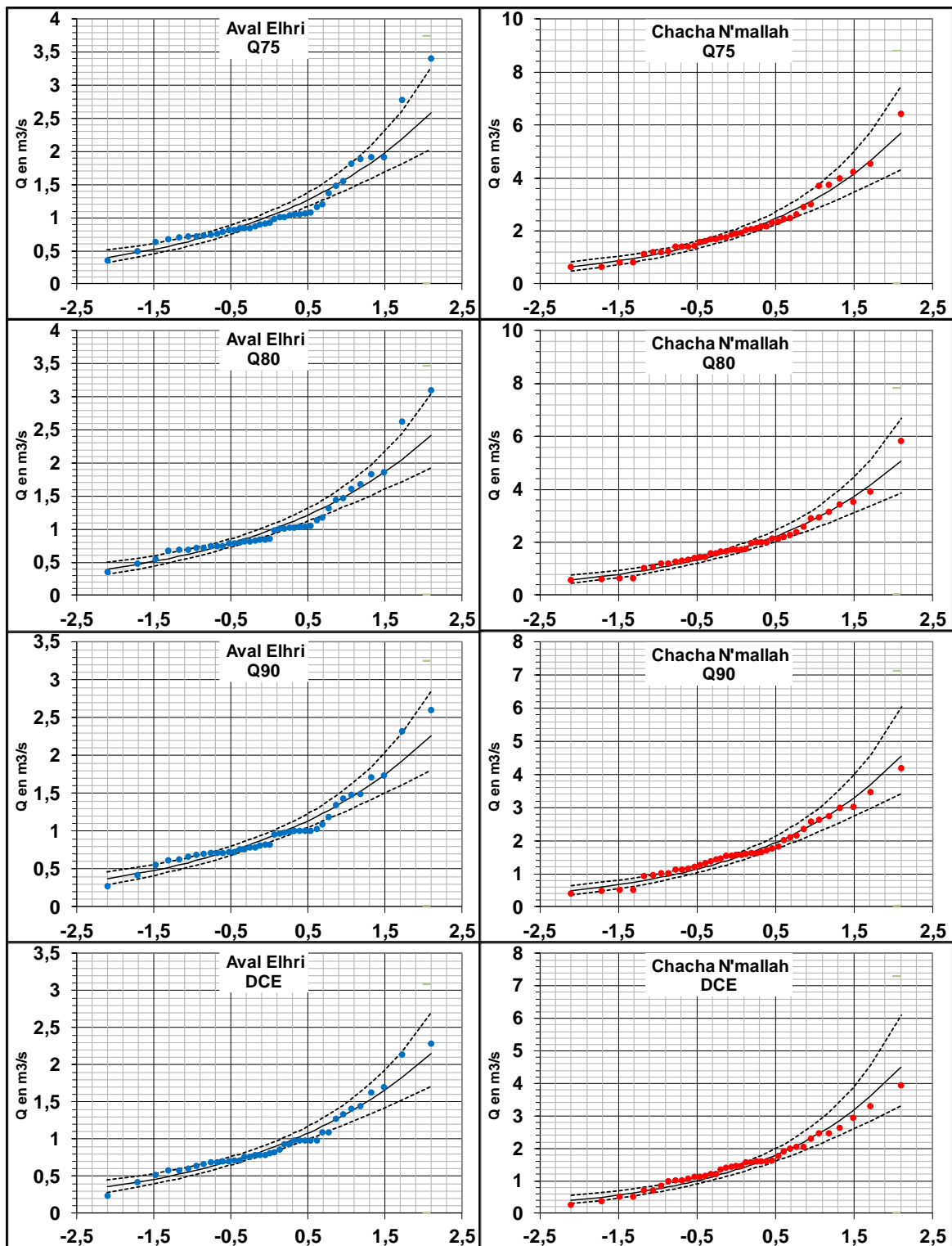


Figure 7-19: Ajustement graphique des DC des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah à la loi Log-normal

• *Estimation des quantiles des débits d'étiage*

L'ajustement permet de proposer des périodes de retours pour les débits caractéristiques étudier. Le tableau suivant présent les résultats des quantiles estimés pour les différentes périodes de retour des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (Tableau 7-18).

Tableau 7-18:Fréquence de retour des débits caractéristiques des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1978-2016)

| Fréquence | | 1/2 | 1/5 | 1/10 |
|--------------------------|-------------------------------------|------|------|------|
| Période de retours (ans) | | 2 | 5 | 10 |
| Aval Elhri | Q ₇₅ (m ³ /s) | 1,00 | 0,70 | 0,59 |
| | Q ₈₀ (m ³ /s) | 0,96 | 0,68 | 0,58 |
| | Q ₉₀ (m ³ /s) | 0,92 | 0,64 | 0,53 |
| | DCE(m ³ /s) | 0,88 | 0,62 | 0,51 |
| Chacha N'mallah | Q ₇₅ (m ³ /s) | 1,90 | 1,23 | 0,98 |
| | Q ₈₀ (m ³ /s) | 1,75 | 1,13 | 0,89 |
| | Q ₉₀ (m ³ /s) | 1,55 | 0,99 | 0,76 |
| | DCE(m ³ /s) | 1,43 | 0,89 | 0,66 |

Les quantiles estimés sont proches pour les périodes de retour $T \leq 5$ ans, en revanche au-delà ils s'écartent suivant la distribution Log-normale. Les quantiles les plus extrêmes ont des grands périodes de retour. En effet, les débits caractéristiques d'étiages les plus faibles possèdent des grandes périodes de retour, cependant les moins sévères ne dépasse pas 2 ans.

4.4. Utilité des DC pour les gestionnaires

Les débits classés offrent un bon compromis pour le calcul du débit d'étiage car ils présentent l'avantage d'une lecture plus aisée du fonctionnement hydrologique globale du cours d'eau. En effet, la CDC donne un maximum d'informations sur les débits d'étiage du cours d'eau, du fait que toute la partie inférieure au Q₅₀ représente en partie l'écoulement souterraine. Ainsi, l'ensemble des études des limitations d'usages peuvent êtres basés sur ces débits caractéristiques. A titre d'exemple, on peut définir le seuil d'entré aux étiages sur la base de ces débits et en y existe plusieurs méthodes de définition qui se base sur ces débits, ce qu'on va présenter dans le chapitre 9.

Synthèse

Nous avons rassemblé les différents indicateurs d'étiage obtenus dans le présent chapitre (Tableau 7-19). Ainsi ces indices sont transformés en débits spécifiques pour permettre la comparaison entre les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou.

Tableau 7-19: Les débits caractéristiques des étiages des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Indicateurs | Aval Elhri | | Chacha N'mallah | |
|-----------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| | m ³ /s | l/s/km ² | m ³ /s | l/s/km ² |
| QMNA (2) | 1,040 | 3,796 | 1,720 | 1,252 |
| QMNA (5) | 0,610 | 2,226 | 0,940 | 0,684 |
| QMNA (10) | 0,390 | 1,423 | 0,540 | 0,393 |
| VCN5 (2) | 0,979 | 3,573 | 1,575 | 1,146 |
| VCN5 (5) | 0,583 | 2,127 | 0,846 | 0,616 |
| VCN5 (10) | 0,376 | 1,371 | 0,465 | 0,338 |
| VCN10 (2) | 0,991 | 3,617 | 1,591 | 1,158 |
| VCN10 (5) | 0,590 | 2,154 | 0,856 | 0,623 |
| VCN10 (10) | 0,381 | 1,390 | 0,472 | 0,344 |
| VCN30 (2) | 1,032 | 3,765 | 1,658 | 1,207 |
| VCN30 (5) | 0,610 | 2,227 | 0,899 | 0,654 |
| VCN30 (10) | 0,390 | 1,424 | 0,502 | 0,365 |
| VCN60 (2) | 1,065 | 3,889 | 1,794 | 1,306 |
| VCN60 (5) | 0,625 | 2,283 | 1,001 | 0,728 |
| VCN60 (10) | 0,395 | 1,443 | 0,586 | 0,426 |
| VCN90 (2) | 1,100 | 4,015 | 1,958 | 1,425 |
| VCN90 (5) | 0,634 | 2,313 | 1,059 | 0,771 |
| VCN90 (10) | 0,390 | 1,424 | 0,589 | 0,429 |
| Q ₅₀ | 1,300 | 4,745 | 2,950 | 2,147 |
| Q ₇₀ | 0,985 | 3,595 | 2,080 | 1,514 |
| Q ₇₅ | 0,905 | 3,303 | 1,890 | 1,376 |
| Q ₈₀ | 0,824 | 3,007 | 1,670 | 1,215 |
| Q ₈₅ | 0,773 | 2,821 | 1,530 | 1,114 |
| Q ₉₀ | 0,725 | 2,646 | 1,260 | 0,917 |
| Q ₉₅ | 0,676 | 2,467 | 1,010 | 0,735 |
| DCE | 0,610 | 2,226 | 0,772 | 0,562 |
| EA | 0,244 | 0,891 | 0,256 | 0,186 |

Les débits d'étiages extraites par les différentes méthodes sont très variables, en fonction de la période de retour choisie et en fonction de l'indicateur. La variation des débits caractéristiques est plus importante dans la station de Chacha N'mallah. Cependant, les débits d'étiages dans le sous bassin de Chbouka sont plus importants et plus stables. Ainsi les débits d'étiage spécifiques de cette dernière sont plus importants. Ceci témoigne l'impact positive de la nappe du secteur amont dans le soutien de ces débits.

Conclusion du chapitre 7 :

Dans le présent chapitre nous avons essayé de déterminer les débits d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou tout en utilisant les indicateurs les plus réponsus dans la bibliographie internationale à différent pas du temps.

À l'échelle mensuelle nous avons utilisé les QMNA. Ces derniers représentent le débit mensuel le plus faible de l'année. À l'échelle journalière, nous avons utilisé les VCNd qui sont les débits moyen mobiles les plus bas sur d jours consécutifs. Nous avons travaillé aussi par les débits caractéristiques issus de la courbe des débits classés. Les résultats obtenus montrent que les débits d'étiage du sous bassin de l'oued de Chbouka sont plus importants que ceux du bassin versant de l'oued de Srou. Ceci témoigne l'importance du soutient assuré par la nappe durant ces phases. Donc, une étude des tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou sera importante dans le cadre de ce travail.

La majorité des débits d'étiages se produite normalement en périodes des basses eaux, en mois de juillet, août et septembre. Des étiages phénoménaux ont été observés pendant la période des hautes eaux, en mois de novembre et décembre. Ces situations sont le résultat d'un prolongement des étiages du au grand déficit pluviométrique.

Les étiages sévères de la chronique d'étude qui ont caractérisé la région du bassin versant de l'oued de Srou ont été produits en 2008. Toutes les faibles valeurs des différents indices utilisés pour l'identification des débits d'étiage ont été apparue durant cette année. Ces faibles débits apparaissent une fois tous les 108 ans.

Chapitre 8 : Les tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) : extraction et analyse

Introduction du chapitre 8

Axe 20 : Extraction des phases de tarissements dans le Bv de Srou (1976-2016)

Axe 21 : Analyse de la variabilité des coefficients de tarissement (1976-2016)

Axe 22 : Ecoulement de base du bassin versant de Srou (1976-2016)

Conclusion du chapitre 8

Introduction du chapitre 8

L'analyse des tarissements se base sur l'étude de la fonction $Q=Q(t)$ en régime non directement influencé par les précipitations. La décroissance des débits des aquifères peut nous renseigner sur le fonctionnement et les caractéristiques de l'aquifère : « le coefficient de tarissement renferme des informations concernant le stockage et les caractéristiques des aquifères » (TALLAKSEN, 1995).

Vue l'importance des sources dans la région du bassin versant de l'oued de Srou, surtout dans la partie amont, et en particulier la région du sous bassin versant de l'oued de Chbouka. Par exemple, les fameuses sources d'Arroggo, les sources de Hmimida, les sources de Lakhzroun, Taghabalout lahmam...etc.



Figure 8-2: Sources d'Arroggo



Figure 8-2: Source sur la route de Kerrouchan

Ces sources connaissent une intense pression surtout que les eaux de surfaces de la zone sont de mauvaise qualité (salinité dépassent largement les seuils acceptables). La situation s'aggrave davantage en période d'étiage où les sources se tarie rapidement, surtout en amont du bassin versant de l'oued de Srou et leur débit devenu faible. Alors que pour les sources qui se trouve dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka leurs débits est un peu régulier avec des petites différences d'écoulement entre la période hivernale et estivale. Dans les années de sécheresses un nombre important de ces sources sont devenus sec. L'origine du problème selon la population riveraine est par convention la diminution des apports pluviométriques.

Les eaux comme nous avons mentionné au début, subis une intense pression, due faite quelle constituent la seule source pour s'approvisionner en eau potable et pour l'agriculture, surtout dans le bassin versant de l'oued de Srou amont la confluence avec l'oued de Chbouka.

Dans ce chapitre nous allons essayer d'analyser les tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou pour la période 1976-2016. L'étude des tarissements est importante car durant la période d'étiage le débit des cours d'eau provient essentiellement des nappes. Nous allons appliquer la « loi de Maillet », pour identifier les tarissements dans notre bassin. Cette loi exprime la relation entre le débit initial et le débit à un instant « t » par le coefficient de tarissement α ; Ce coefficient est caractéristique de la vitesse avec laquelle l'eau des nappes souterraines est restituée aux sources. Au début nous allons nous intéresser aux méthodes de sélection des phases de tarissement. Plusieurs critères ont été pris en considération avant l'identification des périodes de tarissement. Dans ce cadre nous allons appliquer un algorithme spécifique. Les périodes sélectionnées sont analysées puis ajustées à la loi de Maillet pour extraire les coefficients de tarissement. L'identification des débits de tarissement, qui représentent, par définition le débit de base de la rivière, aboutit également à une méthode de séparation des écoulements.

Axe 20 : Extraction des phases de tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Dans cet axe nous allons présenter la méthode choisie d'extraction des phases de tarissement dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou, pour la chronique 1976-2016 ainsi nous allons présenter et analyser les différents résultats obtenus.

1. Critère du choix de la méthode d'extraction des phases de tarissement

Sur la base des définitions des différentes méthodes présentées dans le chapitre 1, nous pouvons conclure que la méthode des courbes enveloppes peut donner des résultats erronés du fait qu'elle ne tient pas en compte les bruits climatiques qui risquent de masquer la manifestation physique du tarissement et par la suite cette méthode ne peut être retenue dans une étude scientifique. La méthode de la courbe de décroissance présente presque le même inconvénient que la méthode précédente au sens où l'on ne dispose d'aucune garantie concernant le processus quantifié. Cette méthode de sélection inclut des débits correspondant à de la décrue ou à du ressuyage alors que l'objet même d'une analyse du tarissement réside dans la suppression des débits susceptibles d'être influencés par les écoulements de surface. Alors que, la méthode des courbes séquences suit par contre une procédure systématique qui intègre des critères de sélection rigoureux garantissant le caractère du tarissement. De plus, si la procédure peut être automatisée pour une première sélection des épisodes de tarissement, un second contrôle réalisé par l'opérateur peut être envisagé.

Donc, il nous paraît que la méthode des courbes séquences est adéquate pour l'analyse des tarissements dans le bassin versant de Srou, vue sa rigueur, son objectivité et le respect de la définition du tarissement. Nous allons utiliser la méthode automatique proposée par Gille et LANG (2007).

2. Méthodologique

La technique de sélection des courbes séquences est une étape très longue et fatigante. L'équipe de recherche du CEGUM de l'université de Metz a proposé une méthode d'extraction des courbes séquences qui se base sur un algorithme posant les deux conditions relatives à la définition du tarissement : sélectionner des débits décroissants consécutifs et des débits non influencés par les précipitations. GILLE ET LANG (2006) ont renforcé l'algorithme et elle a ajouté d'autres critères. Le choix des phases donc sera réalisé en deux étapes :

- *1^{ère} étape :*

Dans cette étape l'identification des séquences de tarissement sera guidée par 3 critères :

- Choix du débit débutant la phase de tarissement : Q_0 max

Il faut éliminer toutes les périodes où le débit est supérieur au module. En effet, au-delà d'un certain seuil, le débit ne peut pas être représentatif du tarissement. Le module constitue une valeur assez élevée, mais il ne s'agit là que d'une procédure automatique aboutissant à un premier tri avant d'introduire des critères de sélection plus précis.

- Seuil de Précipitations Significatives : SPS

Pour une analyse du tarissement, le choix du seuil de précipitations devrait être plus rigoureux car, en fonction du seuil choisi, le nombre d'épisodes retenus peut varier de manière importante.

Dans un contexte climatique comme celui du Maroc, les précipitations ne sont pas en mesure d'influencer l'écoulement en dessous d'un certain seuil car l'évaporation est très importante et elle dépasse les 5 mm/jours en été dans les stations du Taghat et d'Ahmed Elhansali (chapitre 5).

Pour le seuil des pluies significatives (SPS), et selon l'analyse des séquences pluviométriques, présentée en deuxième partie (chapitre 5), le seuil de précipitations significatives a été fixé à 5 mm. Ce choix est basé sur une phase exploratoire dans lequel on a essayé une plage de 1 à 5 mm et on a trouvé que ceci ne change pas fondamentalement les résultats de la statistique pour cette variable. Cependant, si l'on ne tolérait aucune précipitation ($P=0$ mm) durant la période de tarissement, le nombre d'épisodes extraits serait réduit.

- Durée Minimum de la Phase de tarissement : DMP

GILLE ET LANG (2006) a proposé de limiter la durée minimale des phases (DMP), pour avoir un sens. Afin de supprimer les phases trop courtes, elle a été fixée à 5 jours.

- *2^{ème} étape : correction des séquences obtenues*

L'objectif de cette étape est de vérifier l'homogénéité des phases précédemment retenues. Pour éliminer les débits encore influencés par l'écoulement superficiel en début de tarissement, deux procédures sont proposées :

- Introduction d'un délai relatif au Temps de Ressuyage : TR

Il est nécessaire d'attendre que l'influence de la période pluvieuse sur les débits dans le bassin se termine avant le début de la phase de tarissement. Cette période est appelée temps de ressuyage du bassin. Donc, La première procédure de correction consiste à introduire un temps

de ressuyage minimum entre la fin de l'épisode pluvieux et le début de la séquence de tarissement. La formule $TR=A^{0,2}$ proposée dans la bibliographie par LANGBEIN, cité par RUTLEDGE ET DANIEL (1994) permet de déterminer le temps de ressuyage, où TR (durée du ressuyage en jours) est fonction de A (surface du bassin versant en km²).

L'avantage de la présente formule est le pouvoir être appliquée de manière systématique, mais elle ne tient pas en compte les caractéristiques physiques propres à chaque bassin versant et qui modifient largement le temps de réponse de ces derniers. Pour cela GILLE ET LANG (2006) ont ajouté une dernière procédure dont l'objet est de vérifier le choix du débit de départ Q_0 .

- Vérification de Q_0

Dans le but de vérifier les sélections opérées par les paramètres précédents, GILLE ET LANG (2006) ont proposés une méthode de validation ou, le cas échéant, de correction de Q_0 (Figure 8-3).

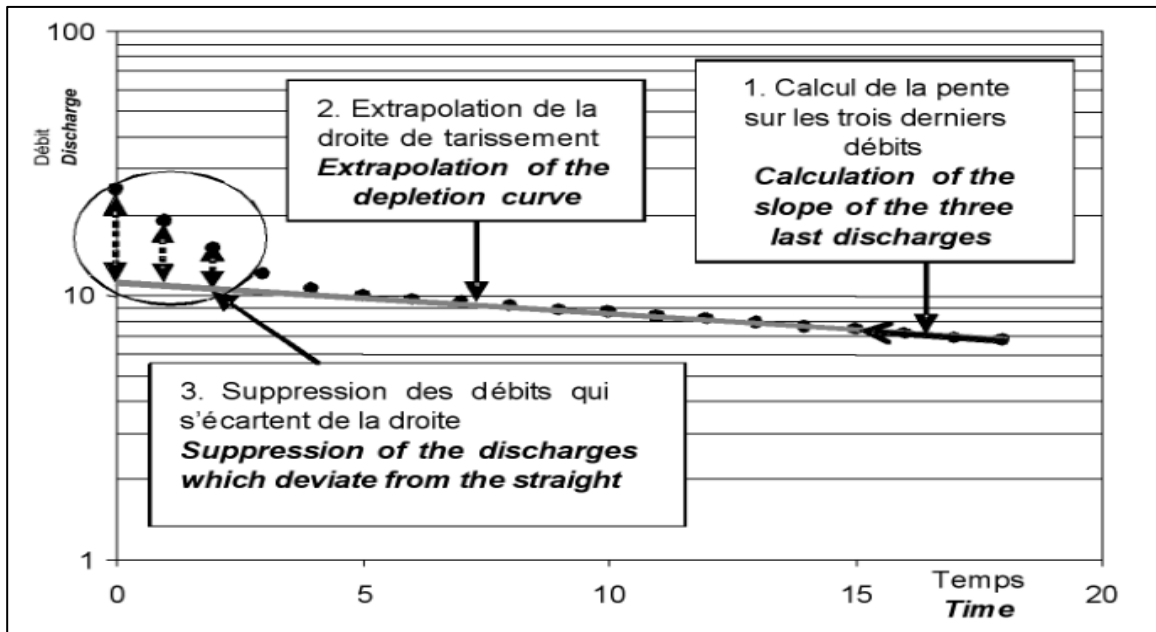


Figure 8-3: Technique de sélection des débits de tarissement en procédant à partir de la fin de l'épisode (Gille & Lang, 2006)

La détermination de Q_0 est réalisée de la manière suivante : la pente de l'épisode est calculée à partir des trois derniers débits de la phase, puis extrapolée vers les jours antérieurs. Les valeurs observées s'écartant de manière significative de la droite extrapolée sont supprimées. Suite à différents essais, l'écart autorisé entre débits observés et extrapolés a été fixé à 1,5 %, ce qui représente la modification d'un quart des séquences (à 4 %, aucune séquence n'est modifiée et à 1 % une sur deux).

La méthode proposée s'appuie sur les derniers débits de la phase de tarissement. L'identification de Q_0 est déterminée à partir de la pente des trois derniers débits de la phase, puis extrapolée vers les débits antérieurs. Les valeurs observées s'écartant de manière significative de la droite extrapolée sont supprimées (Figure 8-4). À la suite de différents essais, l'écart autorisé entre débits observés et extrapolés a été fixé à 1,5 %, ce qui représente généralement la modification d'un quart des séquences (à 4 %, aucune séquence ne serait modifiée, à 1% une séquence sur deux ; l'écart de 1,5 % correspond surtout à la valeur qui respecte le mieux les suppressions que l'on serait tenté d'opérer manuellement) (Gille et Lang, 2007).

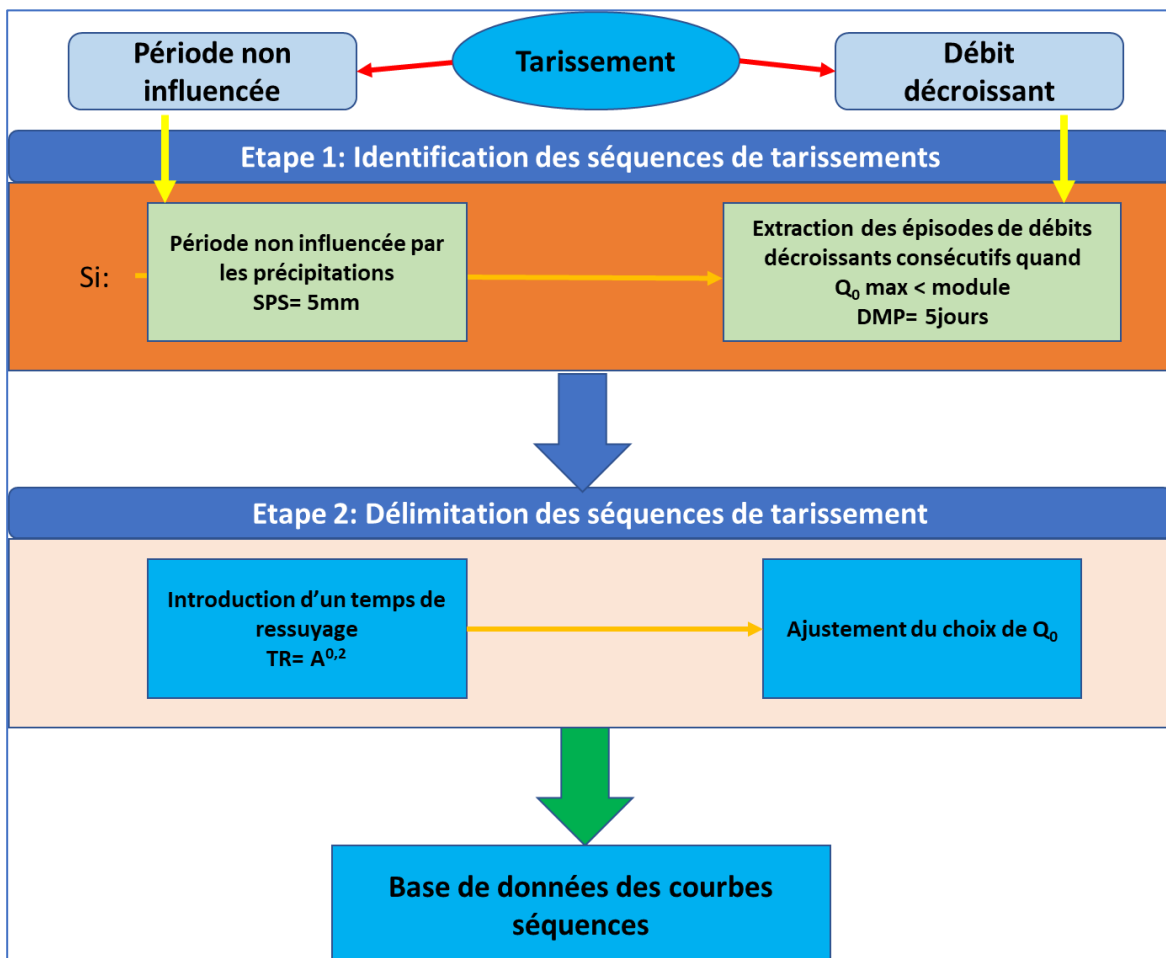


Figure 8-4 : Algorithme d'extraction des courbes séquences (Gille & Lang, 2006).

- **SPS** : Seuil de Précipitations Significatives
- **$Q_0 \max$** : Débit de départ maximal de la phase de tarissement
- **DMP** : Durée Minimum des Phases de tarissement
- **TR** : Temps de Ressuyage
- **A** : Surface du bassin versant

L'algorithme d'extraction des courbes séquences a été appliqué de manière systématique aux débits moyens journaliers des stations de d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah, sur la période 1976-2016.

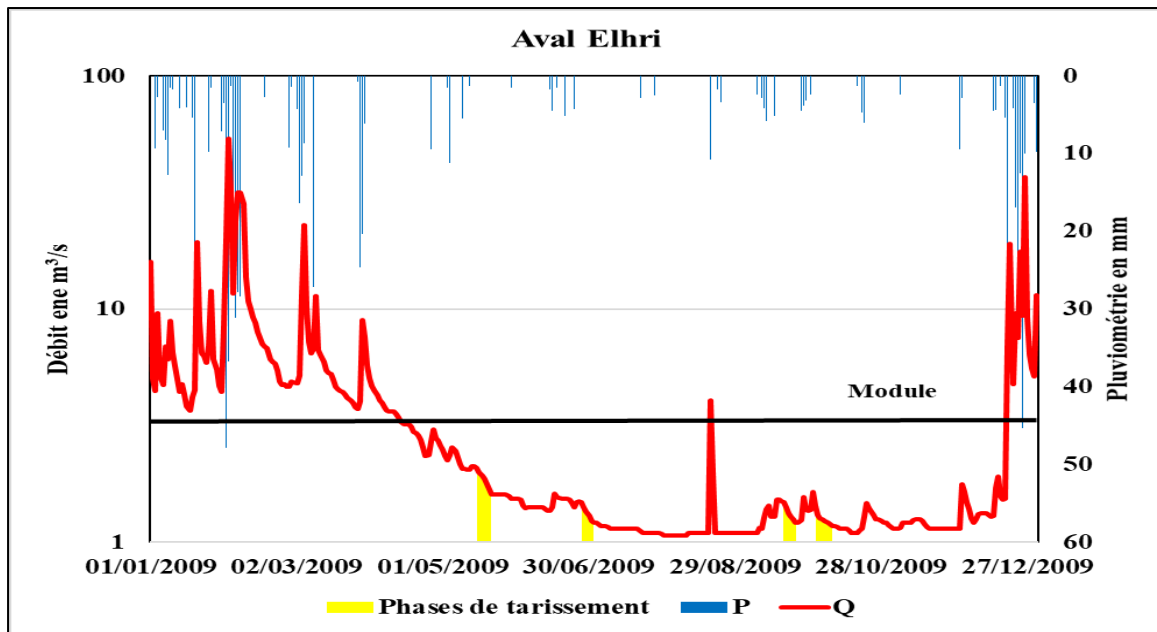


Figure 8-5 : Exemple des phases obtenues en fonction d'hydrogramme et d'hyétogramme pour la station d'Aval Elhri pour l'année 2009.

3. Résultats et interprétations

Les résultats obtenus vont être observés et analysés dans le but d'extraire les principales caractéristiques des épisodes sélectionnés : l'allure générale des épisodes de tarissement, durée des phases, nombre de phases et coefficients de tarissement obtenus.

3.1. Nombre de courbes séquences extraites des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Les épisodes extraits sont vérifiés et validés manuellement. Quelques épisodes situés en hiver sont supprimés car ils ne sont pas représentatifs du tarissement. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau (8-1) :

Tableau 8-1: Nombre des phases de tarissements dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| Stations | Phases | Phases optimisées | % des phases optimisées du total |
|-----------------|--------|-------------------|----------------------------------|
| Aval Elhri | 233 | 161 | 20 % |
| Chacha N'mallah | 237 | 172 | 17 % |

Nous avons obtenu 233 phases dans la station d'Aval Elhri contre 237 dans la station de Chacha N'mallah sur la période 1976-2016, avant la procédure d'ajustement de Q_0 . Après cette étape on passe à 186 épisodes, soit 20 % des phases en Aval d'Elhri et 195, soit 19 % des phases dans la station de Chacha N'mallah (en supprimant les phases observées durant la période des hautes eaux avec des débits importants ou en supprimant parfois les premiers débits des courbes, certains épisodes passent en effet à une durée inférieure à la durée minimale acceptée qui est de 5 jours).

Le nombre maximal de phases retenues concerne la station de Chacha N'mallah qui enregistre 195 épisodes. La station d'Aval Elhri enregistre un nombre d'épisode légèrement faible (186). Ce rapprochement dans le nombre des phases entre les deux stations peut être expliqué par le grand soutient du sous bassin versant de l'oued de Chbouka pendant la période des étiages.

3.2. Distribution des courbes de séquences à l'échelle annuelle

Dans le but de déterminer s'il y a une éventuelle relation saisonnière entre l'apparition des phases de tarissement et le fonctionnement climatique du bassin versant de l'oued de Srou, en particulier l'évapotranspiration, les phases sont observées en fonction de leur apparition au cours de l'année (Figure 8-6).

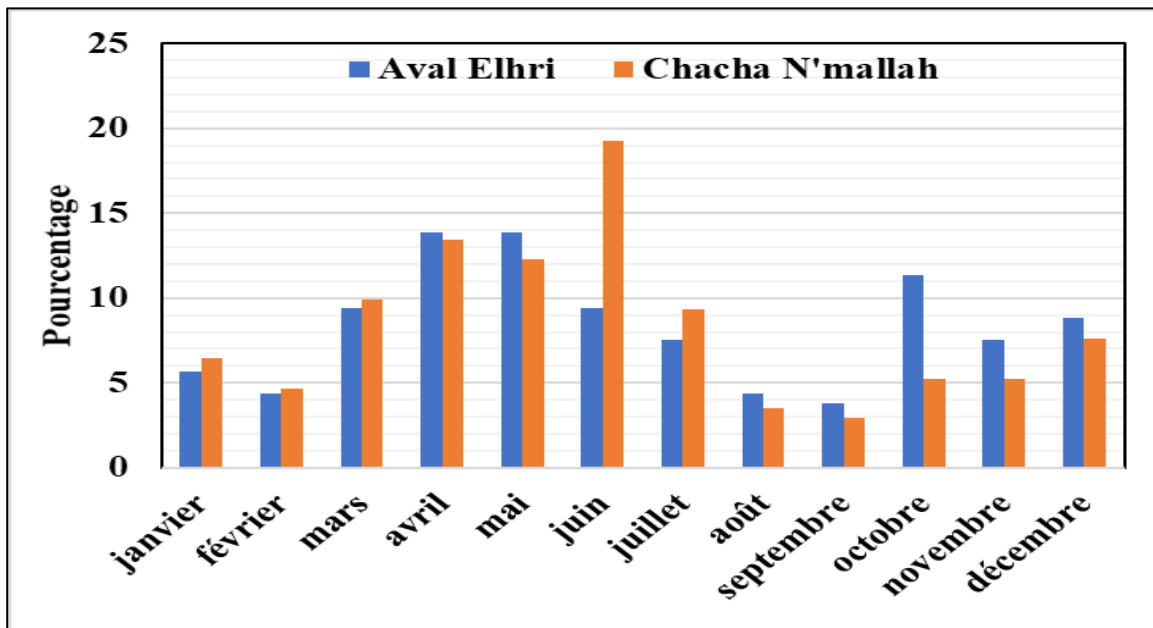


Figure 8-6: Fréquence d'apparition du coefficient de tarissement au cours de l'année dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

La première observation qu'on peut tirer de l'analyse du graphe c'est que les phases de tarissement sont réparties de manière irrégulière au cours des mois de l'année. Les maximums des phases pour les deux stations sont enregistrés entre les mois de mars et de juillet.

3.3. Durée des courbes séquences des stations du bassin versant de l'oued de Srou

Les durées des courbes de séquences dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou sont très variables. La durée moyenne des courbes séquences se situe entre 7 et 8 jours (Tableau 8-2).

Tableau 8-2:Caractéristiques des durées des épisodes de tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
|-------------------------------|------------|-----------------|
| Nombre des phases | 161 | 172 |
| Durée min en jours | 5 | 5 |
| Durée max en jours | 14 | 59 |
| Durée moyenne en jours | 7 | 8 |

La durée maximale des courbes séquences varie en moyenne entre 14 et 59 jours. La station de Chacha N'mallah possède la durée de l'épisode le plus long, elle est démarrée dans le 18 juin 2004. Cependant en Aval d'Elhri cette durée est particulièrement faible, elle a commencé au 15 février 1990. La différence observée entre les deux stations peut être expliquée par le

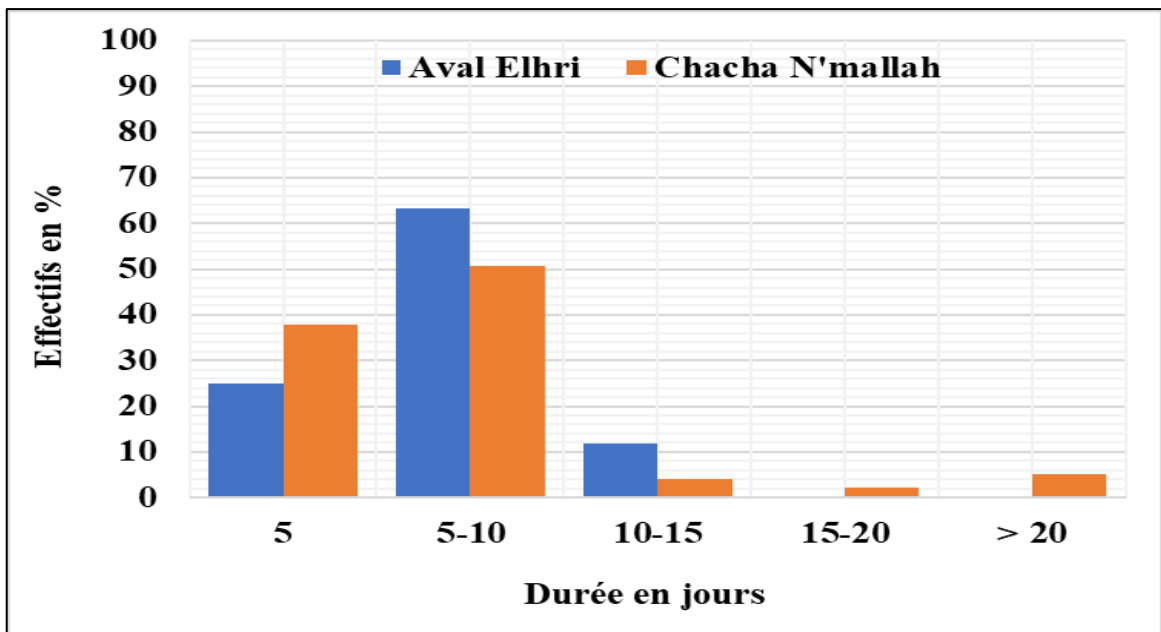


Figure 8-7:Fréquences des durées des épisodes de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

grand soutien des débits d'étiages assuré par le substratum karstique du sous bassin de l'oued de Chbouka.

Le graphe de la figure (8-7) montre la fréquence des durées des épisodes de tarissement pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la chronique (1976-2016). Les épisodes de 5 à 10 jours sont les plus répons dans le bassin avec une fréquence qui dépasse les 80 %. Les phases de durée supérieure à 15 jours sont observées seulement dans la station de Chacha N'mallah.

3.4. Coefficients de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou

Après l'extraction et l'optimisation des phases de tarissement, nous allons ajuster les courbes séquences à la loi de Maillet, dans le but de calculer les coefficients de tarissement α .

Les résultats obtenus montrent une importante variabilité des coefficients de tarissement pour chaque station du bassin versant de l'oued de Srou, malgré les nombreux critères imposés lors de la sélection des phases de tarissement. Le tableau (8-3) rassemble les α les plus forts, les α les plus faibles, les moyennes ainsi que le coefficient de variation Cv.

Les α les plus fort sont observés dans la station de Chacha N'mallah, elle est de l'ordre de 0,1624, avec une variabilité très importante (le coefficient de variation est de l'ordre de 54,09 %). Dans l'oued de Chbouka la valeur max du coefficient de tarissement constitue seulement 47 % de la valeur observée au niveau de la station de Chacha N'mallah avec une variabilité moins importante (Cv= 45,91%).

Tableau 8-3:Variation des coefficients de tarissement dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

| | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
|--------------------------------|------------|-----------------|
| α min | 0,00824 | 0,0035 |
| α max | 0,07796 | 0,1624 |
| α moy | 0,02509 | 0,0324 |
| σ | 0,01152 | 0,0176 |
| Cv | 45,91 | 54,09 |

Les coefficients de tarissement obtenus ne sont pas constants dans le temps. Ils varient, pour la même station, d'un épisode à l'autre et d'une année à l'autre. Cette variabilité des coefficients de tarissements est déjà soulignée dans des travaux portant sur le tarissement des cours d'eau (HLAVE, 1975 ; POINTET, 1975). Les sources de cette variabilité et les facteurs qui sont y responsables sont nombreux. Cette variabilité pose des difficultés pour l'analyse du

fonctionnement des cours d'eau en période de tarissement car il n'est pas aisé de tirer des conclusions sur les rythmes de vidange moyens des aquifères à partir de valeurs aussi dispersées (Lang, 2007). Il apparaît nécessaire d'étudier la relation entre les coefficients de tarissements et les facteurs climatiques saisonniers dans le but d'identifier les facteurs qui pourraient être à l'origine de cette variabilité.

Afin de déterminer s'il y a une éventuelle relation saisonnière du tarissement, les coefficients de tarissement sont observés en fonction de leur apparition au cours de l'année. Nous allons commencer par l'observation des moyens des mois de l'année (le régime) (Figure 8-8).

L'allure des courbes de régimes des α présente une diminution progressive au cours de l'année, similaire à la décroissance des débits depuis les hautes eaux vers les basses eaux. On observe que les coefficients de tarissement les plus faibles apparaissent dans la station d'Aval Elhri en mois d'août alors que dans la station de Chacha N'mallah ils sont observés en mois d'octobre. On note que le suivi de l'évolution des coefficients de tarissement au cours de l'année a permis de confirmer des coefficients globalement plus forts en hiver, mais qui diminuent généralement à mesure que l'on progresse dans les basses eaux.

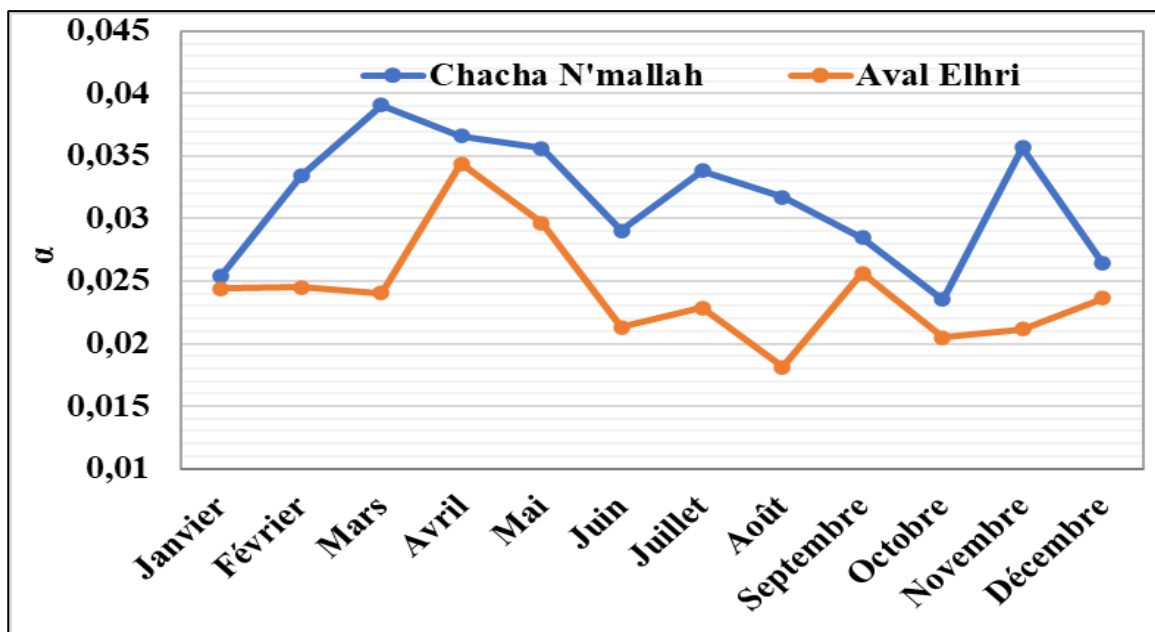


Figure 8-8: Régime moyen des coefficients de tarissements des débits des stations du bassin de l'oued de Srou (1976-2016)

Finalement la forte variabilité des coefficients de tarissement nécessite de proposer une valeur unique de coefficient et de la valider. En effet, afin de pallier cette variabilité et d'aboutir à un coefficient de tarissement moyen le choix s'est orienté vers la construction d'une « courbe maîtresse de tarissement » (Master Recession Curve) pour laquelle l'ensemble des phases de

tarissement définies à partir des chroniques de débits moyens journaliers est utilisé simultanément.

Axe 21 : Analyse de la variabilité des coefficients de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Afin de réaliser une analyse pertinente du tarissement et de proposer une valeur unique du coefficient de vidange et de la valider, les courbes séquences obtenues sont soumises à deux traitements distincts : en premier lieu, l'élaboration d'une courbe maîtresse de tarissement, puis une analyse statistique des coefficients de tarissement. Cette démarche rejoint le schéma proposé par TALLAKSEN (1995), qui montre que l'analyse du tarissement peut être abordée soit par la construction d'une courbe moyenne qui résume toute l'information à travers une valeur moyenne, soit à partir d'une démarche plus analytique qui prend en considération l'ensemble des séquences de tarissement de manière individuelle.

1. Cadre théorique et méthodologique

Nous allons procéder à la construction de courbes maîtresses de tarissement. La présente méthode consiste à caractériser une valeur moyenne d'un α de Maillet par l'ensemble des phases de tarissement. Il existe différentes techniques pour conceptualiser ces courbes. Parmi les méthodes les plus courantes, on recense la méthode des tabulations, la méthode des corrélations et la « Matching Strip Method » (TALLAKSEN, 2000).

Pour la construction de la courbe maîtresse de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou nous utilisons donc la méthode des corrélations. Ladite méthode est déjà citée par (LANGBEIN, 1938, IN TALLAKSEN, 1995) pour laquelle ils proposent de corrélérer des valeurs de débits à pas de temps différents entre eux. Cette méthode est appliquée, soit pour déterminer la pente moyenne d'un épisode de tarissement (TALLAKSEN ET VAN LANEN, 2004), soit pour calculer le rapport $\alpha_t = Q_t/Q_0$ en corrélant les débits Q_0 et Q à t jours (Q_t), à partir de toutes les phases observées : sur le graphique de corrélation, il est possible, en effet, de faire passer une droite de régression dans le nuage de points, aboutissant à une fonction affine d'équation :

$$Q_t = \alpha_t \cdot Q_0$$

Nous allons appliquer la démarche proposée par LEBAUT (2000) pour l'élaboration de la courbe maîtresse. Cette méthode propose un rapport à 5 jours qui correspondent à la pente de la droite de régression entre les débits Q_0 et les débits à 5 jours ($Q_{t=5 \text{ jours}}$), afin de calculer les pentes α_t pour chacune des durées. Les auteurs insistent que les rapports α_t ne doivent pas dépasser les 10 jours car au-delà l'échantillon devient insuffisant pour avoir une moyenne représentative. Cette technique présente d'une part l'avantage de contrôler la qualité de la relation entre les débits Q_0 et Q_t et de repérer éventuellement des points aberrants, afin de les

supprimer et d'autre part, elle permet de contrôler de la qualité des corrélations par le biais des coefficients de corrélations r^2 (LANG, 2007).

1.1. Corrélation entre les Q_0 et les Q_t dans le bassin versant de l'oued de Srou

Les graphes de la figures (8-9) présentent les résultats des corrélations des débits Q_0 et Q à 2, 3, 4 et 10 jours, à partir de toutes les phases observées dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah pour la chronique d'étude 1976-2016. La qualité des ajustements traduite par des valeurs élevées de R^2 . Pour l'exemple la station d'Aval Elhri à 5 jours, la pente est égale à 0,84. Cela signifie que le débit à 5 jours vaut 0,84 % de Q_0 , avec un R^2 étant égal à 95 %, le niveau de précision est donc suffisamment satisfaisant pour que la valeur de la pente soit retenue. Dans la station de Chacha N'mallah la pente à 5 jours est égale à 0,86, ce qui montre que le débit de 5 jours fait 86 % de Q_0 avec un R^2 97 %.

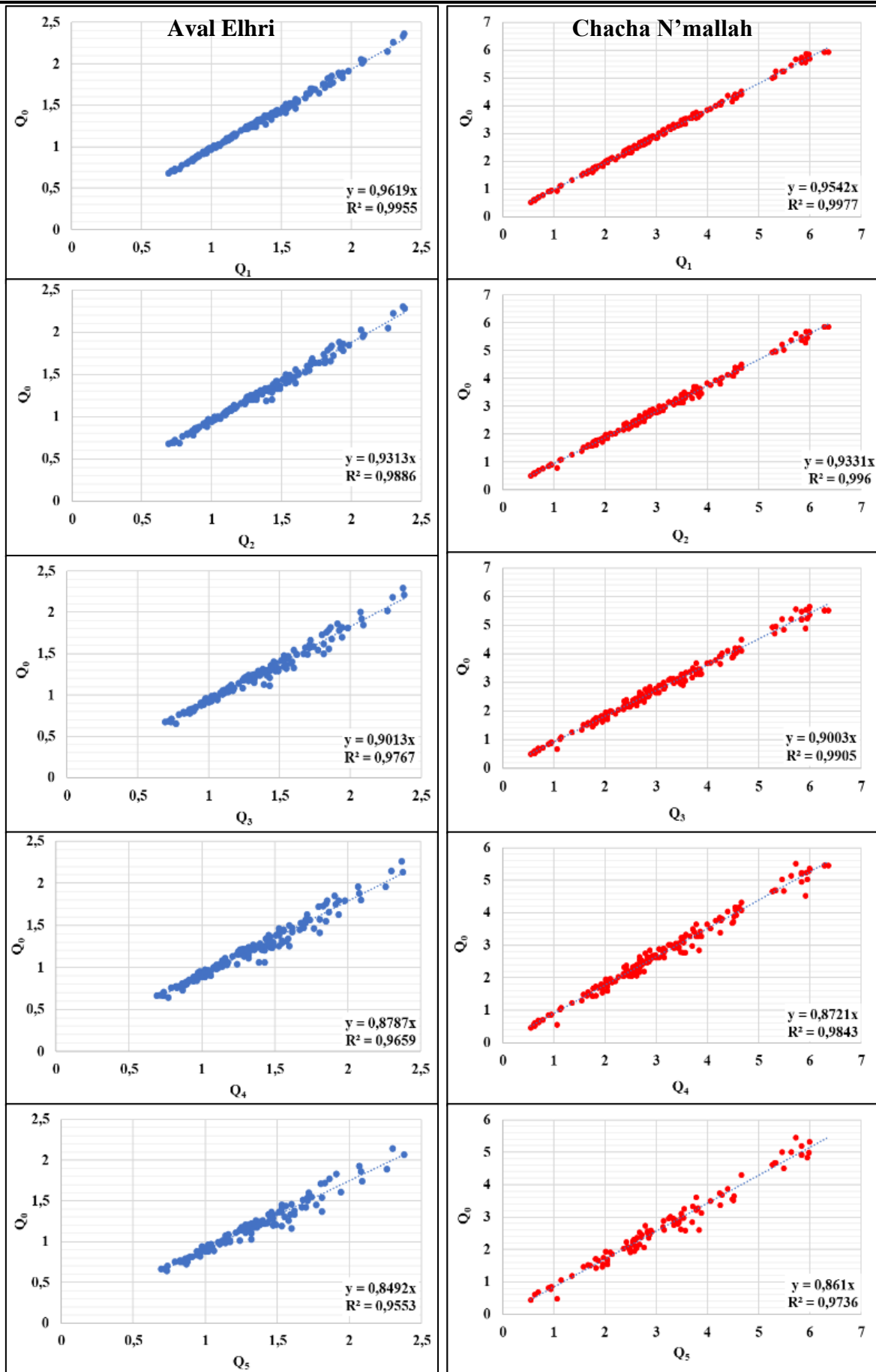


Figure 8-9:Corrélation entre les débits Q_0 et les débits à t jours (Q_t) des courbes séquences des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

1.2. Réalisation de la courbe maîtresse de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou

Les valeurs obtenues des rapports α_t sont mises en relation avec la durée t . On note la diminution de ces rapports avec l'augmentation du nombre de jours. En effet, Si on considère que Q_0 de la station d'Aval Elhri est égal à 100 %, Q_t à 1 jour = 96 % de Q_0 , à 2 jours 93 %, à 3 jours 90 %, à 4 jours 87 % et à 5 jours on se situe à 84 %. La décroissance de ces rapports correspond en définitive à la décroissance des débits moyens en période de tarissement.

Donc, pour réaliser la courbe maîtresse de tarissement, on est obtenu en ajustant le nuage de point $Q(t) = Q(t) + dt$ à une fonction exponentielle de la forme $\alpha_t = e^{-bt}$.

Les graphes de la figure (8-10) présentent les résultats obtenus pour les deux stations du bassin versant de Srou pour la chronique (1976-2016). Finalement, l' α maitre obtenue pour la station d'Aval Elhri est de l'ordre de 0,023 alors que dans la station de Chacha N'mallah il est égale à 0,030.

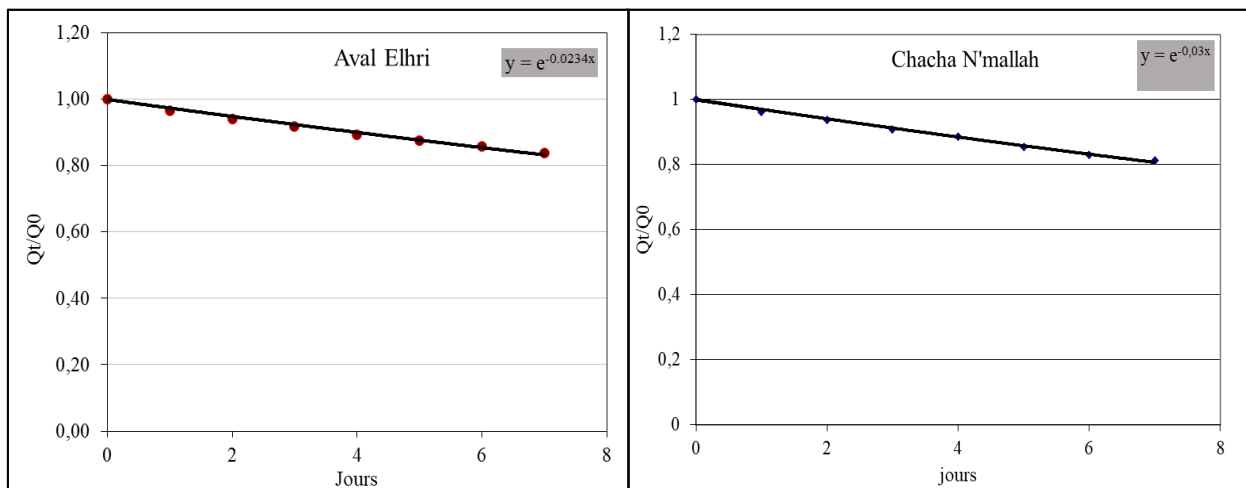


Figure 8-10: Ajustement des α_t à une courbe exponentielle et détermination du coefficient de tarissement de maillet pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

2. Analyse statistique des coefficients de tarissement

Comme nous l'avons montré précédemment, avec ce nombre important de phases extraites par stations complique l'étude. Pour cela nous allons effectuer l'analyse statistique dans le but d'adjoindre une probabilité aux coefficients de tarissement obtenus. Par ailleurs, l'analyse statistique des α séquences permet d'assigner aux coefficients de tarissement une probabilité d'apparition. Elle permet aussi de calculer pour chaque station la valeur moyenne (α moyen), la valeur modale (α modal), ainsi que les quantiles ($\alpha_{0,5}$; $\alpha_{0,25}$; $\alpha_{0,75}$; etc.). La détermination de l' α modal est très importante puisqu'il s'agit du coefficient de tarissement observé le plus souvent. Nous allons effectuer donc, une comparaison entre les différentes α .

L'analyse fréquentielle des coefficients de tarissement des courbes séquences montrent pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou un mode bien identifié au niveau des valeurs les plus faibles (Figure 8-11).

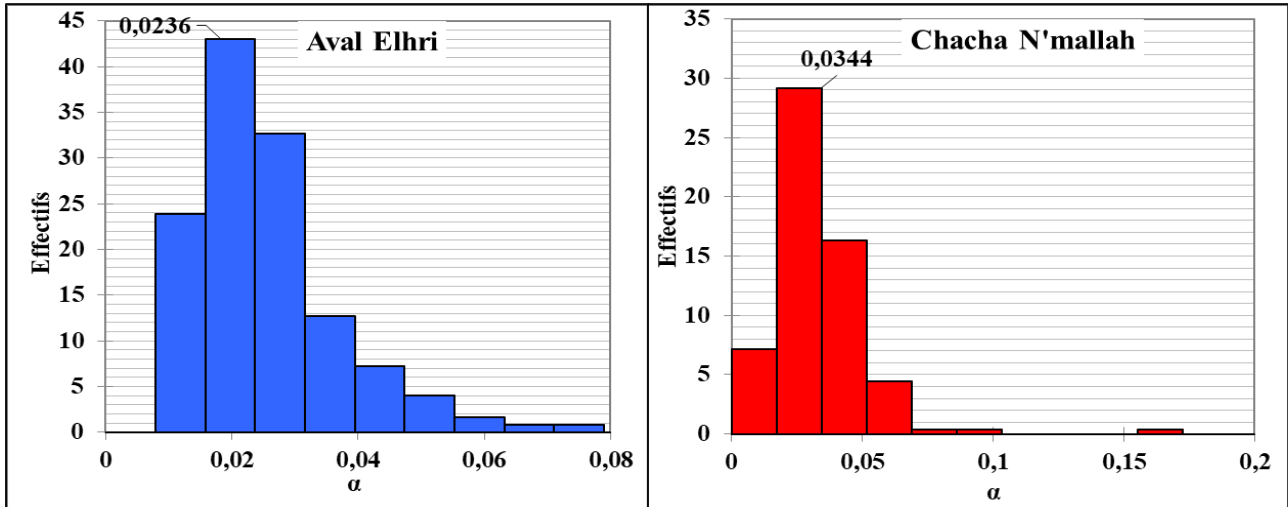


Figure 8-11: Histogrammes de distribution des α séquences des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

2.1. Ajustements des α séquences aux lois de probabilités

Nous allons chercher d'ajuster les valeurs d' α à une loi de probabilité, dans cet objectif on a testé les majeures lois utilisées dans l'analyse des faibles débits. La distribution qui s'ajuste le mieux aux données de la station d'Aval Elhri pour le test d'ajustement est la distribution Log-normale, alors que dans la station de Chacha N'mallah les valeurs d' α s'ajuste bien à la distribution Logistique (Tableau 8-4).

Les valeurs des tests de Komolgorov-Smirnov sont supérieure au niveau de signification seuil $\alpha=0,05$, l'hypothèse est vraie à 97,70 % au niveau de la station d'Aval Elhri, alors qu'elle est vraie à 62,69 % au niveau de la station Chacha N'mallah.

Tableau 8-4 : Ajustements des α séquences de la chronique (1976-2016) des stations du bassin versant de l'oued de Srou aux différentes lois de probabilité

| Distribution | Valeur de p | |
|--------------------|--------------|-----------------|
| | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
| Bêta | 0,692 | 0,053 |
| Bêta4 | 0,148 | 0,011 |
| Khi ² | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Erlang | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Exponentielle | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Fisher-Tippett (1) | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Fisher-Tippett (2) | 0,803 | 0,115 |
| Gamma (1) | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Gamma (2) | 0,679 | 0,021 |
| GEV | 0,897 | 0,431 |
| Gumbel | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Log-normale | 0,977 | 0,002 |
| Logistique | 0,331 | 0,627 |
| Normale | 0,037 | 0,009 |
| Normale standard | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Student | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Weibull (1) | < 0,0001 | < 0,0001 |
| Weibull (2) | 0,149 | 0,026 |
| Weibull (3) | 0,218 | 0,008 |

L'analyse statistique aboutit en définitive au calcul, pour chaque bassin versant, de la valeur moyenne (α moyen), la valeur modale (α modal), ainsi que des valeurs de quantiles (α 0,25 et α 0,75) rassemblées dans le tableau (8-5).

Tableau 8-5: α maître, α modal, α médian, α moyen et α de fréquences 0,25 et 0,75 des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016).

| | Aval Elhri | Chacha N'mallah |
|----------------------------|------------|-----------------|
| α moyen | 0,0250 | 0,0324 |
| α maître | 0,023 | 0,0300 |
| α modal | 0,0236 | 0,0344 |
| α médian | 0,0232 | 0,0302 |
| α de fréquence 0,25 | 0,0170 | 0,0236 |
| α de fréquence 0,75 | 0,0300 | 0,0381 |

2.2. Analyse et interprétation des résultats

L'application des deux méthodes de recherche d'une valeur représentative du coefficient de tarissement moyen du cours d'eau présente plusieurs avantages. On note que l' α modal constitue une valeur plus intéressante que l' α moyen ou l' α maître, notamment pour réaliser des prévisions de débits fondées sur le coefficient de tarissement, car il a plus de chances d'être observé (LANG, 2007). Le recours au calcul de quantiles pour les coefficients de tarissement constitue par ailleurs une approche intéressante qui permet, notamment pour la prévision de débits, d'encadrer les valeurs par des rails de probabilité construits à partir de ces quantiles de coefficients de tarissement.

Les rythmes de tarissement les plus élevés sont observés dans la station de Chacha N'mallah. A l'inverse, les rythmes de tarissement les plus lents s'observent au niveau de la station d'Aval Elhri. Cette variabilité spatiale du coefficient de tarissement peut être dû aux différences géologique et hydrogéologiques des milieux dans lesquels les bassins sont inscrits.

L'écart entre les coefficients maîtres et les coefficients modaux sont les plus forts dans la station de Chacha N'mallah (bassin imperméable sur une grande partie). En Aval d'Elhri l'écart est un peu faible (bassin perméable). L'écart important observé au niveau de la station de Chacha N'mallah peut être dû à la méthode de construction de la courbe maîtresse, qui donne une grande importance aux premiers débits. Ces derniers peuvent être sous l'influence du ressuyage, expliquant des décroissances plus rapides.

Les rythmes de vidange les plus lents concernent le sous bassin versant de l'oued de Chbouka alimentés par les calcaires et les dolomies du Moyen-Atlas central (coefficients de tarissement $< 0,0236$). A l'opposé, les coefficients de tarissement les plus forts concernent le bassins versants développés sur les substrats imperméables des argiles du Trias influencé par un soutient de la nappe calcaro-dolomitique du Moyen-Atlas (coefficients de tarissement de $0,0344$).

L'utilisation de la valeur modale permet de réaliser automatiquement un tri statistique qui exclut les coefficients les plus forts. Selon certains auteurs le coefficient modal, puisqu'il est plus faible que le coefficient moyen ou maître, peut-être choisi pour représenter le rythme de tarissement moyen des bassins versants. Alors que pour le cas où les séquences de tarissement qui sont trop peu nombreuses pour justifier une analyse statistique, la méthode de l' α maître reste appropriée et peut constituer une bonne alternative.

Les valeurs moyennes sont utilisées pour observer la variabilité géographique des coefficients de tarissement. La connaissance des configurations géologiques des bassins versants doit permettre de valider ces valeurs moyennes.

On note vers la fin que jusqu'à maintenant aucune relation mathématique entre les coefficients de tarissement et la géologie des bassins n'est établie. Plusieurs tentatives des régressions multiples, mais sans résultats. La difficulté à relier ces deux variables est d'ailleurs soulignée par des auteurs tels que TALLAKSEN (1995) ET LANG (2007). Mais ce qu'on peut retenir c'est que le bassin versant de l'oued de Srou connaisse un tarissement rapide alors que le sous bassin de Chbouka se vide lentement, ce qui permet de garantir un écoulement de base important durant les périodes d'étiage.

Axe 22 : Écoulement de base du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Le débit de base désigne les débits observés durant les phases de tarissement qui correspondent uniquement au débit de nappe. Son évaluation se fait par dissociation des hydrogrammes des débits journaliers, en débit de ruissellement et débit de base.

1. Cadre méthodologique

Plusieurs méthodes de séparation des hydrogrammes sont proposées en bibliographie (méthode empirique, SLOTO ET CROUSE, 1996 ; méthode statistique, GAMEZ ET ZUMSTEIN, 1993 ; méthode manuelle, LAMBERT, 1975). Ces techniques ne permettent pas de déterminer avec précision la part du débit de base dans l'écoulement total (CHAPMAN, 1999). En effet, à part les études réalisées sur des bassins expérimentaux bien équipés (piézomètre, source mesurée), ou en utilisant des méthodes d'analyses physico-chimiques et d'hydrologie isotopique (UHLENBROOK ET HOEG, 2003), aucune méthode ne permet de valider une séparation des écoulements.

Nous allons donc, bénéficier des courbes de séquences déjà obtenues pour la séparation des débits de bases à partir des hydrogrammes. En effet, pendant les périodes de tarissement le débit des cours d'eau correspond par définition uniquement au débit de nappe.

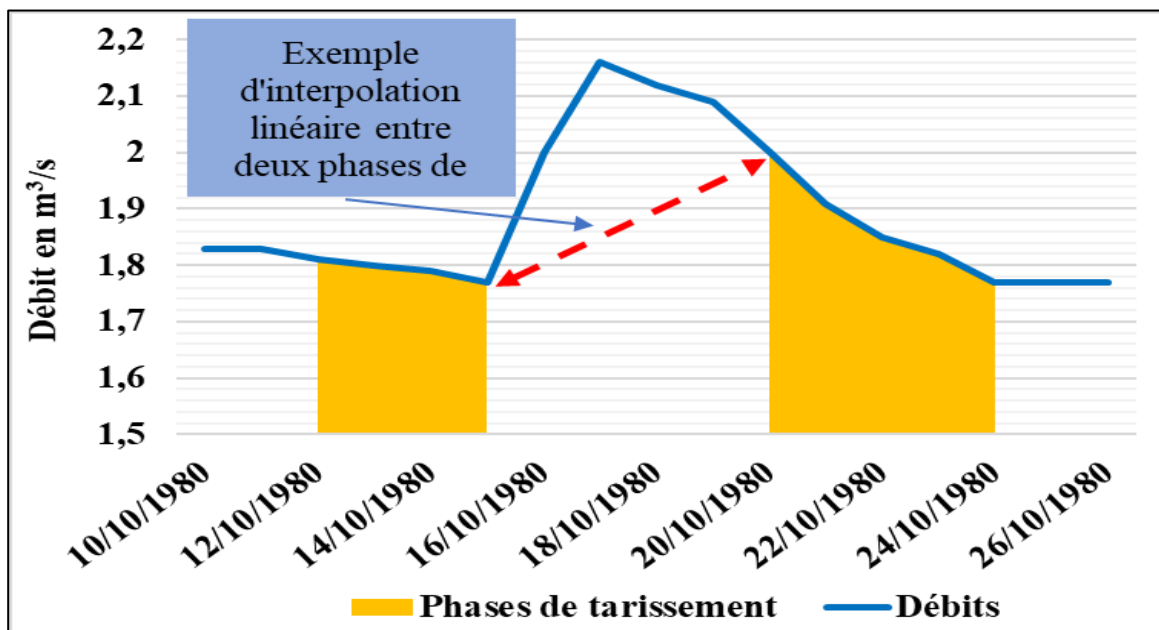


Figure 8-12 : Exemple de la procédure d'interpolation linéaire dans le tracé du débit de base pour la station d'Aval Elhri.

La procédure de séparation des hydrogrammes se base sur l'analyse des tarissements et en particulier les courbes de séquences. Parce qu'en période des tarissements le ruissellement est

nul ou négligeable. Le principe de la méthode consiste à reproduire la technique de séparation des séquences, mais cette fois sans imposer de durée minimum aux phases (durée précédemment fixée à 5 jours). Ensuite les débits obtenus vont constituer les piliers pour le tracé du débit de base, qui vont être reliés par une interpolation linéaire (Figure 8-12).

2. Résultats et interprétations

Les graphes de la figure (8-13) présentent la variabilité des débits de base dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah pour la période 1976-2016.

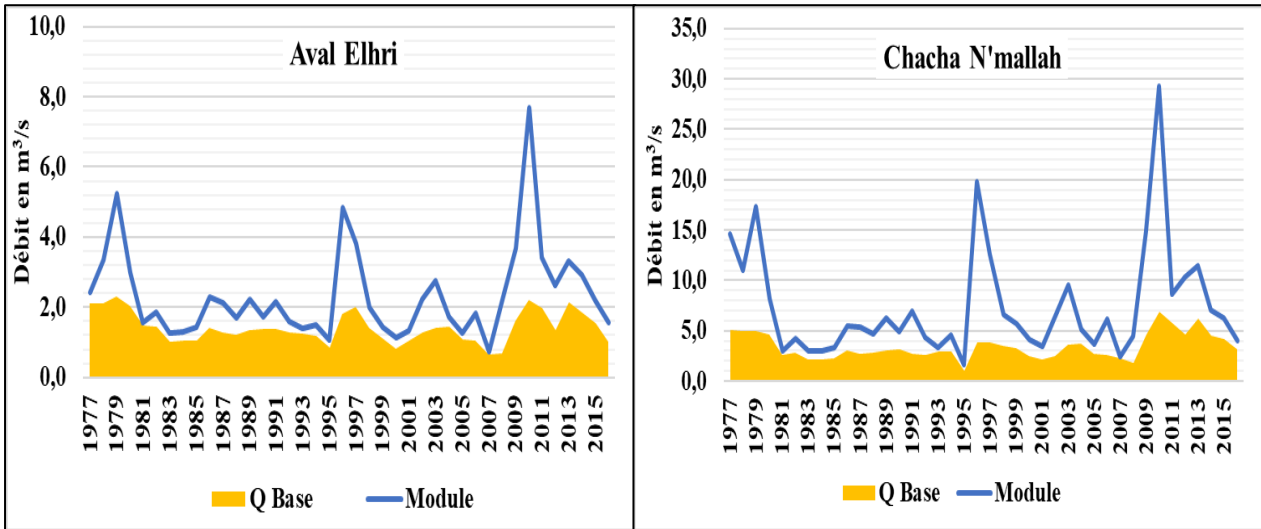


Figure 8-13: Variabilité annuelle du débit de base dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Ces débits sont plus importants dans la station d'Aval Elhri par rapport aux autres observés dans la station de Chacha N'mallah. Les débits de bases sont plus stables dans le temps que les modules, le Cv de variation au niveau des stations du bassin versant de l'oued de Srou ne dépasse pas les 36 %. Les plus faibles valeurs de débit de base correspondent aux mêmes années déficitaires observées dans le bassin, il s'agit des années 2007 et 2008 en Aval d'Elhri et 1995 et 2008 dans la station du Chacha N'mallah.

Pour déterminer la part des débits de bases des débits écoulés dans le bassin versant de l'oued de Srou on fait appel à l'indice de débit de base (IDB). En effet, l'indice d'écoulement de base (IDB) est le rapport entre ce volume et le volume total de l'écoulement, exprimé en pourcentage. Nous avons calculé cet indice (IDB) pour toute la période d'étude (1976-2016) pour les deux stations du bassin.

Les résultats (Figure 8-14) montrent que les comportements hydrologiques de l'oued de Srou et de son affluent l'oued de Chbouka, sont importants. La part de débit de base dans l'écoulement total est élevée ; L'indice d'écoulement de base dépasse les 67 % dans la station

d'Aval Elhri et 56% dans la station de Chacha N'mallah, durant la période d'étude. Ceci s'explique évidemment par le fort rendement hydrologique des formations perméables du Moyen-Atlas d'où l'oued de Srou et son affluent l'oued Chbouka prennent leurs origines.

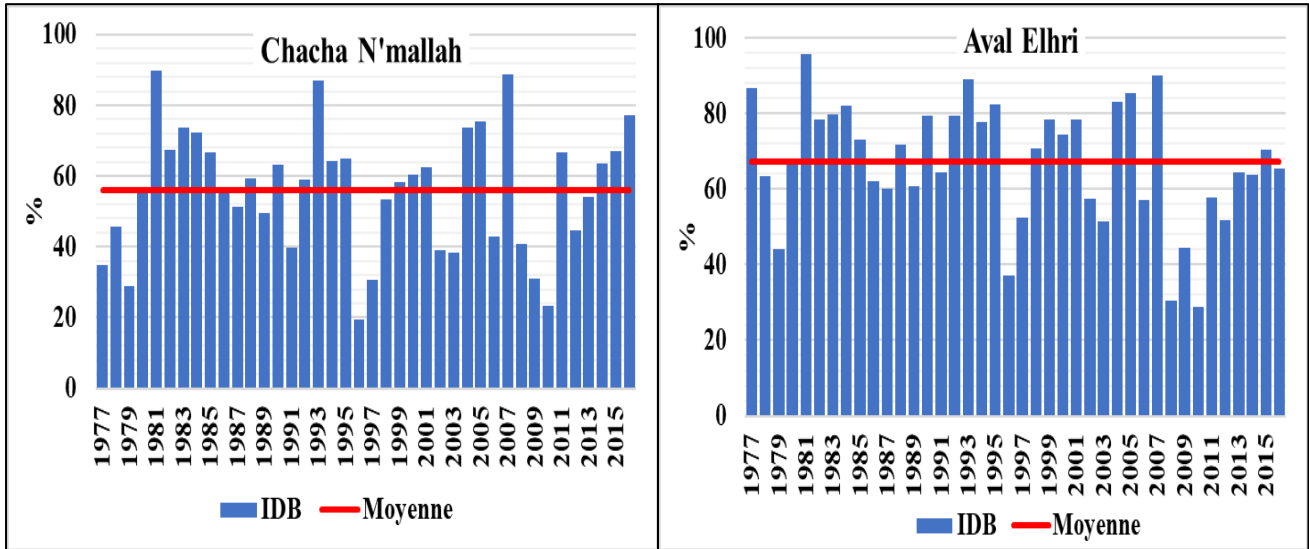


Figure 8-14 : Variation des IDB dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

PARDE (cité par FRECAUT, 1967) a classé les cours d'eau en trois catégories en fonction de la diversité géologique des milieux traversés et en fonction des IDB : « les cours d'eau à alimentation souterraine faible, inférieure à 30 %, les cours d'eau à alimentation souterraine assez forte, de 30 à 50 %, les cours d'eau à alimentation souterraine très forte ou formidable, de 50 à 90 % ».

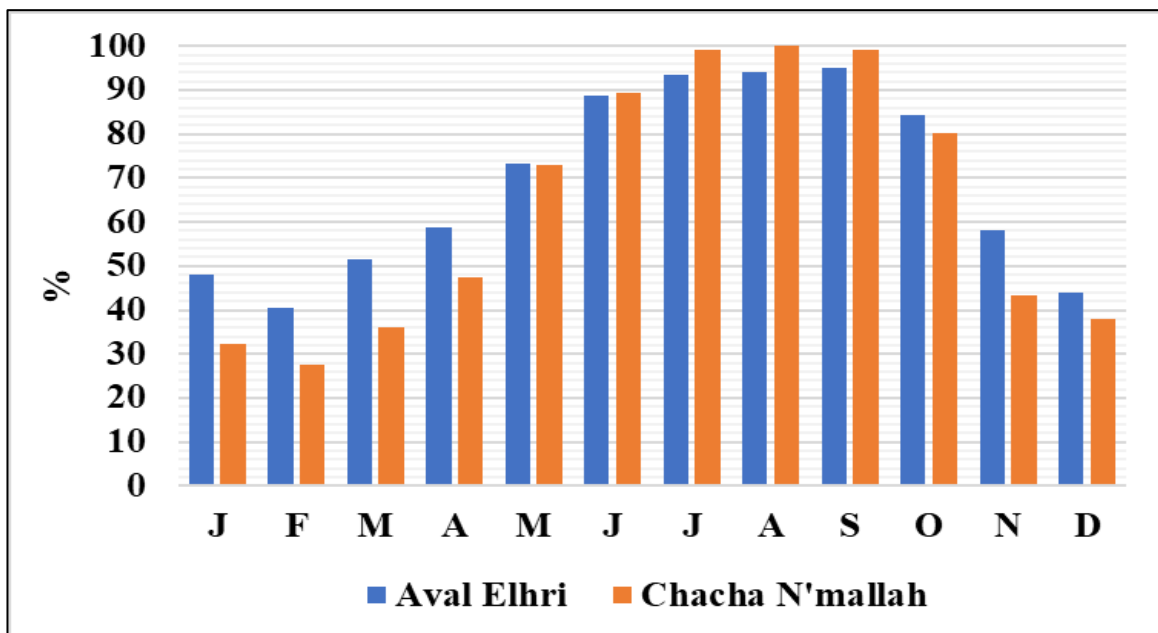


Figure 8-15: Variation mensuelle des IDB dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)

Donc, selon cette proposition les cours d'eau de notre bassin sont parmi les cours d'eau qui profitent d'une alimentation souterraine très forte.

À l'échelle mensuelle, les IDB les plus forts sont observées durant les mois des basses eaux et les plus faibles pendant les mois des hautes eaux (Figure 8-15).

Pendant les mois de juillet, août et septembre, la part des débits de bases des débits écoulés dépassent les 90%. Ce qui montre que le débit en période d'étiage vient essentiellement de la nappe. Alors, que dans la période des basses eaux les débits observés sont influencés par les ruissellements et le débit de base ne dépasse pas les 50 % dans les débits écoulés.

Conclusion du chapitre 8 :

Ce chapitre a permis d'analyser les tarissements dans un contexte climatique marocain semi-aride, le bassin versant de l'oued de Srou, en absence des perturbations par les pluies. En adoptant à une sélection des débits de tarissement qui s'appuie sur un algorithme automatique de la méthode de sélection appelée courbes séquences et qui se base sur une série de critères dont l'objectif est de garantir l'homogénéité des débits retenus.

Le nombre des phases pour chaque station dépasse les 230 avec une durée moyenne des épisodes de 7 à 8 jours. Le nombre important d'épisodes obtenus pour ces stations présente l'avantage de calculer les coefficients de tarissement par la loi de Maillet pour toutes les décroissances de débits observés en période de tarissement. En revanche les coefficients de tarissements présentent une grande variabilité difficile à interpréter.

La construction de la courbe maîtresse de tarissement et l'analyse statistique ont permis de surmonter la variabilité du coefficient de tarissement. En effet, l' α maître, α modal, α médian, α moyen et α de fréquences 0,25 et 0,75, ont permis les rythmes de vidange des nappes qui assurent l'alimentation des principaux cours d'eau du bassin versant de l'oued de Srou. Le débit de nappe constitue une part importante des débits écoulés dans le bassin, plus de 90 % des volumes écoulés sont en provenance des aquifères Moyen-Atlasiques.

Chapitre 9 : Les étiages et sa gestion dans le bassin versant de l'oued de Srou : réglementations, seuils et sévérité

Introduction du chapitre 9

Axe 23 : Cadre réglementaire et insuffisance des politiques de gestion des étiages au Maroc

Axe 24 : Seuils et débit d'entrée aux étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou.

Axe 25 : Analyse de la sévérité des étiages dans le bassin versant de l'oued de srou (1976-2016).

Conclusion du chapitre 9

Introduction du chapitre 9

Le principal problème de la gestion des ressources en eau est de trouver un équilibre entre le disponible et les utilisateurs de l'eau. La gestion des crises et des tensions liées à la diminution de la ressource en eau lors des périodes de sécheresse se traduit par la mise en place de mesures réglementaires visant à concilier les différents usages avec la préservation du milieu aquatique. Les réglementations définies et appliquées pour la gestion de la ressource en eau et particulier durant les périodes d'étiages sont différents suivant les pays. Ces réglementations se fondent sur les indices d'étiage précédemment définis. Ainsi, les indices portant sur la durée et le déficit d'un événement d'étiage sont utiles lorsque la demande en eau est importante (YEVJEVICH, 1967 ; NATHAN ET MCMAHON, 1990 ; TALLAKSEN ET VAN LANEN, 2004).

Au Maroc, pays de potentialité fragile en matière de ressources en eau, la gestion de ces derniers reste inefficace surtout en période d'étiage. Malgré les grands apports en matière de gestion qualitative et quantitative des textes législatifs, notamment les lois de l'eau ; 10-95 et 36-15, ils sont inefficaces dans la gestion des situations des étiages et la proposition des solutions et des limites d'usages. Vu ce grand manque et vu le grand problème de la pénurie en eau observé durant les dernières décennies, on va chercher d'ailleurs et on va faire une lecture dans les différentes réglementations internationales qui visent à gérer les situations d'étiages, dans le but de proposer des seuils de gestions et des limites d'utilisation. Ainsi une analyse de la sévérité des situations des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou sera réalisée dans le cadre ce chapitre.

Axe 23 : Cadre réglementaire et insuffisance des politiques de gestion des étiages au Maroc

Les réglementations associées à la gestion des ressources en eau varient selon les pays. Avec les différentes définitions du débit d'étiage et des processus qui lui sont associés, ce phénomène peut avoir de nombreux impacts, à la fois sur les écosystèmes et sur les activités humaines. Ainsi, de nombreuses politiques ont été mises en place pour améliorer la gestion des ressources en eau.

1. Gestion des ressources en eau au Maroc

L'organisation et la police de l'eau existaient depuis des siècles et ont donné lieu à des recueils de textes coutumiers dit « Orf », droits assez exhaustifs, précis et dont l'intensité et la rigueur augmentent avec la rareté de l'eau (EL JIHAD, 1982 ; FARUQUI ET AL., 2001 ; BAZZNA ET DE MEULEMEESTER, 2009).

Les premiers textes concertants la gestion de l'eau au Maroc se date de 1914, soit deux ans seulement après l'instauration du protectorat français. Il s'agit du dahir du 7 Chaâbane 1332 (1^{er} juillet 1914) sur le domaine public qui sera complété par les dahirs de 1919 et 1925. Ils intègrent toutes les eaux, quelle que soit leur forme, au domaine public hydraulique. D'autres textes ont été élaborés par la suite comme le « code des eaux au Maroc » pour faire face aux nouveaux besoins.

Après l'indépendance, les politiques de l'eau menées au Maroc ont permis de surmonter plusieurs défis. L'accès à l'eau potable est quasi généralisé, augmentation de terres agricoles irrigués et les barrages qui ont permis de réguler au moins en partie les cours d'eau, de protéger les biens et les personnes contre des inondations et de produire une part significative d'électricité. La sécheresse des années quatre-vingt et son impact sur la gestion de l'eau, a conduit à la révision de ces textes (dahirs, arrêtes, codes) qui étaient devenus obsolètes.

L'état a donc lancé une longue et profonde réflexion qui a abouti à la promulgation de la loi 10-95. Puis, la loi 36-15 vient modifier et compléter la loi 10-95 sur l'eau qui, malgré les grandes avancées réalisées, s'est trouvée confrontée à certaines difficultés pour assurer une gestion efficace et durable des ressources en eau.

1.1. La loi 10-95 de l'eau

La loi 10-95 a fixé pour objectif la mise en place d'une politique nationale de l'eau basée sur une vision prospective qui tient compte à la fois de l'évolution des ressources et des besoins nationaux en eau. Elle se compose de 13 chapitres et 123 articles. Les objectifs assignés à cette

loi sont : la planification harmonieuse et flexible de l'utilisation des ressources hydriques au niveau national et régional, la mobilisation globale et la gestion rationnelle des ressources en eau, la gestion des ressources en eau dans le cadre du bassin hydraulique ainsi la protection et la mise en valeur quantitative et qualitative du domaine public hydraulique.

La mise en œuvre de la loi 10-95 relative à l'eau et ses textes d'application a permis la réalisation de nombreux acquis. Mais le diagnostic établis par l'autorité gouvernementale chargée de l'eau sur la base des études thématiques qu'elle a réalisé et de l'évaluation de l'application de cette loi par les agences des bassins hydrauliques a démontré que la présente loi n'est plus adaptée aux mutations qu'a connu le secteur de l'eau à la suite de l'évolution du contexte socioéconomique du Maroc. Les limites de la loi 10-95 sur l'eau sont liées principalement à :

- L'absence de règles juridiques concernant le dessalement des eaux de mer et aux faiblesses des dispositions régissant la réutilisation des eaux usées et la valorisation des eaux pluviales ce qui entrave la mise en œuvre de projets de dessalement, de réutilisation et de valorisation sur la base d'un cadre réglementaire exhaustif et clair ;
- La carence des dispositions relatives à la protection contre les inondations ;
- La complexité des procédures de délimitation et d'utilisation du domaine public hydraulique, ce qui ne facilite pas l'aboutissement de ces procédures dans des délais raisonnables ;
- L'absence de définitions pour certaines expressions telle que l'expression « rejet direct ou indirect » prévue à l'article 52 de la loi ce qui a donné lieu à de multiples interprétations et a retardé, par conséquent, la mise en œuvre du principe « pollueur payeur » ;
- Aux difficultés rencontrées par les conseils d'administration en matière de gestion et de contrôle des agences des bassins hydrauliques en raison de la composition et du nombre élevé des membres de ces conseils ;

En vue de dépasser les points de faiblesses observé dans la présente loi, il s'avère très important d'actualiser la législation de l'eau, dans le but d'adapter les textes aux exigences du développement durable et aux effets conjugués de la désertification et des changements climatiques. Une nouvelle loi sur l'eau a été élaboré en 2016, il s'agit de la loi 36-15.

1.2. La loi 36-15 de l'eau

La loi 36-15 vient modifier et compléter la loi 10-95 sur l'eau. Cette loi comprend 163 articles regroupés en 12 chapitres. Les principaux objectifs de cette loi sont la consolidation des

acquis réalisés par la mise en œuvre de la loi 10-95 sur l'eau et l'amélioration de la gouvernance du secteur de l'eau, notamment, à travers :

- La simplification des procédures d'utilisation du domaine public hydraulique ;
- La mise en place d'un cadre réglementaire adéquat pour la valorisation et l'utilisation des eaux pluviales et des eaux usées ;
- La mise en place d'un cadre réglementaire dédié au dessalement des eaux de mer ;
- Le renforcement du cadre institutionnel par la création d'un Conseil de Bassin Hydraulique, le renforcement et la clarification des attributions du Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, des Agences des Bassins Hydrauliques et Commissions Provinciales ou Préfectorales de l'Eau ainsi que l'élargissement de leurs compositions ;
- Le renforcement des outils de protection et de préservation des milieux aquatiques ;
- L'amélioration des conditions de prévention des phénomènes extrêmes liés aux changements climatiques en précisant les rôles des intervenants et les outils de gestion des risques d'inondations et de sécheresse ;
- Le renforcement de la police de l'eau par l'amélioration des conditions d'exercice de la police et le durcissement des sanctions pécuniaires.

Malgré les grandes avancées réalisées, s'est trouvée confrontée à certaines difficultés pour assurer une gestion efficace et durable des ressources en eau, en particulier elle n'a pas proposé des mesures de gestion des débits d'étiages.

1.3. Gestion des étiages au Maroc

Malgré l'arsenal juridique que constitue la loi sur l'eau 10-95 et 36-15, le Maroc, ne possède pas de textes législatifs claires relatifs aux débits d'étiage qui seraient intéressants dans le cadre de la protection des eaux. A l'exception de l'article 97, relative à la conservation de l'eau, qui mentionne que « le niveau des cours d'eau, selon les saisons, est maintenu à un niveau minimum en deçà des aménagements hydrauliques destinés à stocker, détourner ou aller chercher de l'eau. L'article 86 de la même loi précise qu'« en cas de pénurie d'eau résultant d'événements autres que la sécheresse, l'administration fait connaître la situation de pénurie d'eau, précise la zone concernée et décide des mesures locales et temporaires visant à assurer la priorité à l'approvisionnement de la population avec de l'eau et abreuver les animaux.

Le 10^{ème} chapitre de la présente loi a mis l'accent sur la gestion des risques liés à l'eau (les inondations, protection et prévention des risques d'inondations, dispositifs de détection, de

surveillance et d'alerte, gestion des événements d'inondations, la pénurie d'eau). Cinq articles de la deuxième section sont consacrés pour la gestion de la pénurie en eau (article 129 à 133).

L'article 129 explique le rôle de l'agence de bassin hydraulique dans l'établissement d'un plan de gestion de la pénurie d'eau en cas de sécheresse en concertation avec l'administration et les établissements publics et les collectivités territoriales concernés. Ce plan doit contenir des mesures préétablis selon le degré de pénurie et intégrer tous les secteurs usagers pour une gestion proactive de la pénurie d'eau. Les modalités d'établissement et de révision du plan de gestion de la pénurie d'eau sont fixées par voie réglementaire. L'agence de bassin hydraulique doit mettre en place un système de suivi des situations hydriques à travers des indicateurs hydro-climatiques (l'article 130).

En cas de pénurie d'eau l'administration, sur proposition de l'agence du bassin hydraulique, déclare l'état de pénurie d'eau, définit la zone concernée et édicte sur la base du plan de gestion de la pénurie d'eau les mesures locales et temporaires en donnant la priorité à l'approvisionnement en eau des populations (article 131). Alors qu'en cas de pénurie d'eau due à des événements autres que la sécheresse l'administration déclare l'état de pénurie, définit la zone concernée et édicte les mesures locales et temporaires (article 132).

Outre les dispositions prévues aux articles 131 et 132 ci-dessus, et à défaut d'accord amiable avec les intéressés, l'administration peut procéder, conformément à la législation et à la réglementation en vigueur, à des réquisitions, en vue de mobiliser les ressources en eau nécessaires pour assurer l'approvisionnement en eau potable des populations (article 133).

Donc, les niveaux de gestion de la pénurie en eau sont définis « qualitativement » au niveau national, alors les valeurs de débit inférieures n'ont pas de définition précise au sens statistique. Ce choix est ainsi laissé aux responsables de bassin pour tenir compte du contexte et des spécificités locales du terrain (en fonction de l'abondance des ressources en eau et des différents usages).

Ce qu'on peut remarquer qu'il n'y a pas de schéma clair, basé sur des études statistiques de l'état des ressources en eau, à travers lequel des indicateurs de débit de rareté sont déterminés, et donc des seuils d'intensité sont fixés qui reflètent les niveaux d'intervention pour édicter des restrictions sur les utilisateurs d'eau.

1.4. Etudes sur les étiages au Maroc

Au Maroc, on note un grand manque dans les études concernant les étiages, à l'exception de quelques études d'hydrologie analytique qui traite l'étiages comme un élément du cycle hydrologique et quelques rapports. Nous citons à titre d'exemple :

MOUHDI (1993) dans son travail hydrologique sur l'oued Mellouya (bassin de Melouya), a essayé de proposer un débit/seuil pour caractériser les étiages en fonction de la réalité de l'exploitation des eaux dans la zone d'étude. Ensuite, il a effectué une analyse statistique sur les séquences, les durées et les périodes de retours.

L'étude hydro-climatique réalisé par CHARRAD (1996) dans le bassin de l'oued Grou, dont la quelle il a essayé de caractériser les débits d'étiages à l'échelle mensuelle. Ainsi il a déterminé la sévérité ainsi les périodes de retours.

L'étude hydro-climatique de SERBOUT (2001) réalisé dans le haut bassin de l'Oum-Er-Rbia dont la quelle il effectué une analyse fréquentielle des débits d'étiages mensuels. Il a aussi déterminé l'indice de sévérité des étiages.

L'étude hydrologique et qualitative des eaux du haut bassin de l'oued Inaoune réalisé par NOUARA (2012) dont laquelle il a caractérisé les débits d'étiages par les DCE.

Le travail hydrologique de QADEM (2015) sur le haut Sbou dont lequel il a introduit les QMNA et les VCN de 3, 10 et 30 jours dans la caractérisation des débits d'étiages. Il a aussi réalisé une étude comparative et fréquentielles de ces indicateurs.

On note également l'étude « DETECTION D'EVOLUTIONS DANS LES REGIMES HYDROLOGIQUES DU BASSIN DU SEBOU », qui a été réalisée dans le cadre du programme d'étude « Changement climatique : impacts sur le Maroc et options d'adaptation globale » en 2010, le seuil du débit de d'étiage a été déterminé comme un pourcentage qui correspond à 15 % du débit journalier classé pour la série, ce qui correspond au débit caractéristique Q_{85} (85 % du débit dépassé).

Devant cette insuffisance des législations en matière de gestions des débits d'étiages, on va faire une analyse des politiques utiliser dans d'autre pays du monde dans le but de proposer des seuils adaptés au contexte hydro climatique marocain.

2. Réglementations et gestion des étiages dans le monde

Certains systèmes d'alerte de pénurie ont été développés principalement en Europe, ainsi qu'aux États-Unis, au Canada et ailleurs dans le monde, et sont appliqués aux bassins fluviaux exposés à une pénurie plus sévère. Ces systèmes d'alarme reposent sur un seuil de débit auquel des restrictions de prélèvement d'eau sont imposées. Citons par exemple QMNA (5) pour la France, Q_{95} pour l'Autriche et la Grande-Bretagne, et Q_{97} pour la Suisse...

Dans la province du Québec au Canada, l'hiver entraîne souvent une sécheresse sévère, où les chutes de neige s'accumulent en surface sans atteindre le réseau d'eau et les aquifères. Un faible débit peut également se produire en été ou au début de l'automne, lorsque les pluies sont rares pendant de longues périodes. Le ministère des Ressources naturelles et de la Faune de la

province de Québec s'est appuyé sur la variable Q7,10 qui fait référence au débit de sécheresse avec une période de retour de 10 ans sur une période de sept jours consécutifs (VCN7(10)), en plus de la variable Q30,5, qui fait référence au débit de rareté avec une période de retour de 5 ans sur 30 jours consécutifs (VCN30 (5)) (HAMZA, 1999).

La méthode du Montana, connue sous le nom de méthode de Tennant, est également adoptée au Canada, aux États-Unis et même dans le monde, et c'est la méthode hydrologique la plus utilisée pour déterminer le débit écologique (THARME, 2003). Il a été développé principalement pour les rivières du centre de l'Amérique du Nord. La seule donnée requise est le débit annuel moyen (QMA), ce qui en fait une méthode très simple. Un pourcentage est approuvé par l'QMA pour évaluer l'état général de la rivière. Huit classes de débit ont été identifiées dans chacune des deux grandes périodes de l'année (octobre à mars et avril à septembre). Le débit réservé ne dépassant pas 30 % du débit annuel moyen a été considéré comme généralement approprié pour la période estivale et est généralement la valeur utilisée pour la protection de l'écosystème (BELZILE ET AL, 1997).

Au niveau de l'Union Européenne, le Parlement européen a adopté la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) en 23 octobre 2000 et qui ont fixé une politique et ils ont mis des objectifs communs afin d'atteindre un « bon état qualitatif et quantitatif des milieux aquatiques » superficiels et souterrains en 2015. Sur la base de cette directive, la France a élaboré la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (loi LEMA réunissant la Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 et la Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006). Cette loi fixe un certain nombre d'objectifs parmi lesquels on retrouve la préservation des écosystèmes aquatiques, la protection contre toute pollution et la restauration de la qualité des eaux, la valorisation de l'eau comme ressource économique et la répartition de cette ressource de manière satisfaisante.

On note qu'en France, les premières réglementations relatives à la gestion des ressources en eau ont été promulguées en 1992. Elles ont permis de reconnaître à l'époque la ressource en eau comme « patrimoine commun de la nation » et d'identifier les premières mesures de gestion et de protection de la ressource à travers la création de schémas directeurs d'aménagement et de gestion de l'eau (SDAGE) qui gèrent les grands bassins hydrographiques français et Schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) pour gérer les ressources en eau à l'échelle des sous-bassins (GARCIA, 2016). L'essentiel de la gestion passe alors par un contrôle administratif des usages au moyen de procédures de déclaration et d'autorisation. En ce qui concerne l'étiage, les lois cités précédemment ont permis aux préfets de décider des arrêtés cadres limitant ou interdisant les usages de l'eau en cas de sécheresses importantes. Mais après la sécheresse de 2003 qui a frappé la totalité de la France, un Plan Cadre Sécheresse a été mis en place à l'échelle

nationale en 2005 pour une meilleure gestion de la ressource en eau. Quatre niveaux d'intervention ont été définis, de la vigilance à la crise renforcée, pour instaurer différentes restrictions en fonction du stade de sécheresse observée. Ces niveaux permettent de faire un équilibre entre la préservation des écosystèmes, la santé et les différents usages de l'eau (agriculture, industrie et usages domestiques) (GARCIA, 2016).

- ***Le Plan Cadre Sécheresse en France***

Le Plan Sécheresse fixe un cadre national de gestion de la ressource en eau. Il doit permettre de prévenir les déséquilibres entre prélèvements et ressources disponibles, en imposant des limitations temporaires de certains usages de l'eau. Ce plan définit notamment le débit seuil d'alerte (DSA), qui correspond au seuil en dessous duquel les premières restrictions doivent être prises. L'objectif est d'éviter d'atteindre le débit de crise (DCR), valeur de débit en dessous de laquelle l'alimentation en eau potable ainsi que la survie des espèces aquatiques sont menacées.

Ce plan est fondé sur la mise en place de mesures progressives de limitations d'usages dits « non prioritaires », l'objectif étant d'assurer les usages prioritaires, en particulier l'alimentation en eau potable et la préservation des milieux aquatiques. Pour l'utilisation de l'eau potable, par exemple, les limitations d'usages non prioritaires vont concerner, dans l'ordre, les restrictions suivantes : le remplissage des piscines privées, le lavage des véhicules en dehors d'une station de lavage, le lavage des voies et des trottoirs, l'arrosage des pelouses et espaces verts, l'arrosage des jardins potagers et le nettoyage des terrasses et façades ne faisant pas l'objet de travaux. Ce Plan Sécheresse définit différents stades relatifs à la gravité de la situation :

- Le seuil de vigilance : à ce stade, des mesures de communication et de sensibilisation à l'économie d'eau sont mises en place auprès des différents usagers, sans pour autant que des mesures de limitations soient prises ;
- Le niveau d'alerte : ce niveau doit être garanti statistiquement au moins 8 années sur 10. En cas de franchissement de ce niveau, les premières mesures de limitation des usages de l'eau doivent être prises ;
- Le niveau de crise : des limitations progressives de prélèvements, voire des suppressions de certains usages sont mises en place. A ce stade, l'objectif est de ne pas atteindre le niveau de crise renforcé ;
- Le niveau de crise renforcé : en dessous de ce seuil, l'alimentation en eau potable et la survie des espèces aquatiques sont menacées.

LANG (2011), a mis une classification des niveaux de crise en fonction des statistiques de débits exposées précédemment (Figure 9-1).

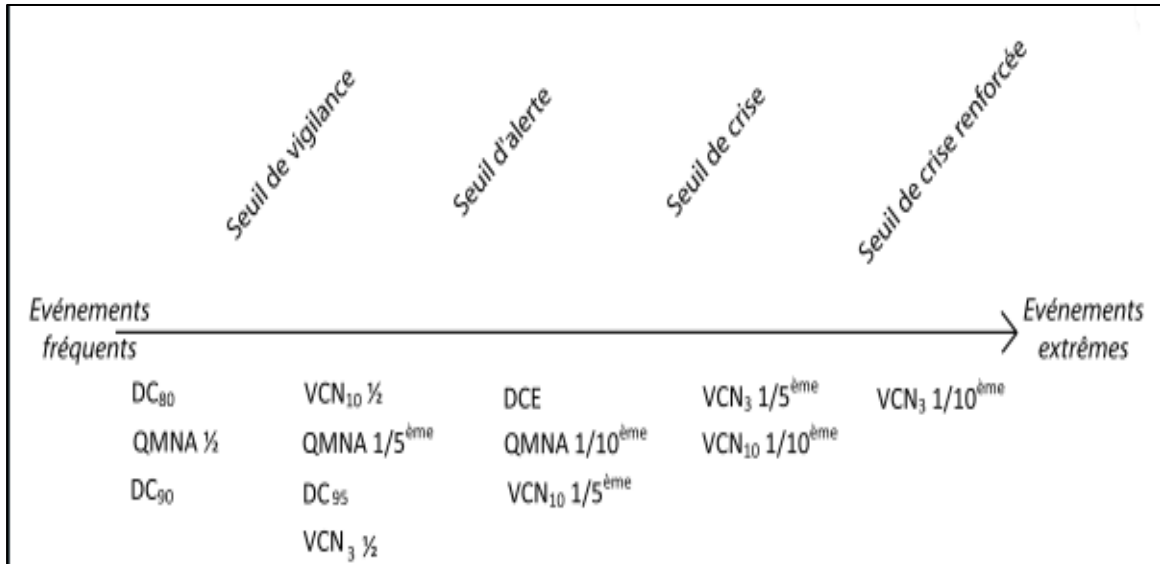


Figure 9-1: Indicateurs statistiques de débit suggérés par Lang (2011) pour déterminer l'état de la situation hydrologique en étiage

Axe 24 : Débits limites et seuils d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou

L'analyse des étiages peut donc également être abordée en fixant une limite aux débits et seules les valeurs inférieures à cette limite sont retenues pour la statistique des débits d'étiage. Plusieurs auteurs ont essayé de définir des limites pour les débits d'étiages, on note à titre exemple la synthèse exhaustive réalisée par FRECAUT (1975). Au contraire de la limite entre les hautes eaux et les basses eaux, qui est facilement identifiable à l'aide du module, le début de l'étiage est plus difficile à déterminer. Cette détermination s'accompagne dans tous les cas d'une part de subjectivité. Dans ce qui suit on va essayer de proposer une limite d'entrée aux étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou, ainsi la proposition des seuils réglementaires pour la gestion de la ressource en eau pendant les périodes de pénurie.

1. Débits limites d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou

Plusieurs propositions pour les débits d'entrés aux étiages. BERNIER OU LARRAS, cités par FRECAUT (1975), mentionnent que ce débit "seraient toujours inférieurs au débit moyen mensuel minimal « normal »". Par contre, LAHEURTE, cité aussi par FRECAUT (1975), a proposé une limite plus sévère, qu'il qualifie de "débit journalier limite d'étiage", c'est « la moitié du débit moyen mensuel minimal (normal) ». PARDE (1963) c'est basé sur les débits spécifiques, pour définir le débit d'entré aux étiages, il indique que « dans le régime pluvial, les valeurs types des étiages extrêmes sont de 0,5 à 1,5 l/s/km². LANG (2007), a critiquée le recours à une telle faible valeur dans l'identification des étiages. En effet, le choix d'un débit limite trop sévère conduirait à une sélection d'événements particulièrement rares et trop peu nombreux pour pouvoir en entreprendre un traitement statistique et en décrire la dynamique. Pour cela, elle a proposé d'utiliser le débit modal dans la mesure où celui-ci semble bien se rapprocher d'un débit d'étiage.

D'autres auteurs, proposent que les débits d'entrés aux d'étiages puissent être identifier partir de la courbe des débits classés. Ces valeurs correspondant généralement à des fréquences au dépassement comprises entre 70 et 95 % de la courbe des débits classés (FLEIG ET AL., 2006). Par exemple, GOTTSCHALK ET AL., (1997) qui se fondent sur le seuil 70 %, EL-JABI ET AL., (1997) qui ont recours au seuil 90 % et TALLAKSEN ET AL. (1997) réalisent une analyse des durées et volumes déficitaires pour laquelle trois seuils différents sont utilisés : 50, 70 et 90 %.

Pour cette recherche, nous choisissons de définir cette limite à partir du débit le plus fréquent ou débit modal et la courbe des débits classés.

2.1. Le débit modal comme débit limite d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou

Dans le but de fixer une limite supérieure pour l'identification des débits l'étiage, on peut choisir le débit modal comme débit d'entrée aux valeurs d'étiage. Si on considère que les débits d'étiage sont des débits extrêmes, leur caractère exceptionnel impose en effet qu'ils ne peuvent être supérieurs à la valeur de débit le plus fréquent (débit modale) (LANG, 2016). De même que le module sépare les hautes eaux des basses eaux, le débit modal pourrait donc apparaître comme une valeur limite pour l'échantillonnage des débits d'étiage.

- *Définition du débit modal*

En 1928, A.F. MEYER (in J.K. SEARCY, 1959) définit le débit modal comme étant le débit « normal » (normal flow), dans la mesure où il s'agit du débit qui apparaît le plus souvent. D'une façon générale le débit modal constitue donc une valeur lue ou extraite de la courbe des débits classés (VOGEL, 1994), mais aucune précision sur la méthode de calcul n'est clairement apportée.

- *Méthodologie*

Trois méthodes sont proposées pour la détermination des débits modales d'un cours d'eau :

- Estimation à partir des histogrammes de fréquences des débits moyens journaliers
- Estimation à partir de la courbe des débits classés
- Estimation théorique par ajustement des débits moyens journaliers.

Les trois méthodes convergent vers des valeurs de mode relativement proches. La relation entre le mode issu de l'histogramme et le mode provenant de la courbe des débits classés est bien sûr très forte, car les deux procédures de calcul sont très proches (LANG, 2016).

Nous adoptons la distribution des débits moyens journaliers. Cette méthode repose sur une représentation par un histogramme où l'on reporte en abscisse les classes de débit et en ordonnée le nombre de jours où les débits de cette classe sont observés. C'est une méthode rapide, puisque la lecture de l'histogramme permet d'isoler facilement la valeur du débit modal, soit le centre de la classe la plus représentée.

- *Résultats*

Nous allons appliquer cette méthode aux données des débits journaliers des deux stations de Chacha N'mallah et d'Aval Elhri sur une chronique de 41 ans. On a fixé 3 classes ; 300, 600 et 800. Les graphes de la figure (9-2) présentent les résultats obtenus.

Les débits modaux selon les différentes classes sont représentés dans le tableau (9-1). Même si les modes varient en fonction du nombre de classes retenues, on observe néanmoins une stabilisation assez sensible des valeurs, le Cv ne dépasse pas 5 % dans les deux stations. Le calcul des débits modaux à partir de cette méthode s'appuie donc sur 600 classes, seuil qui nous paraît pertinent pour des chroniques de débit qui comprennent au minimum 15310 données.

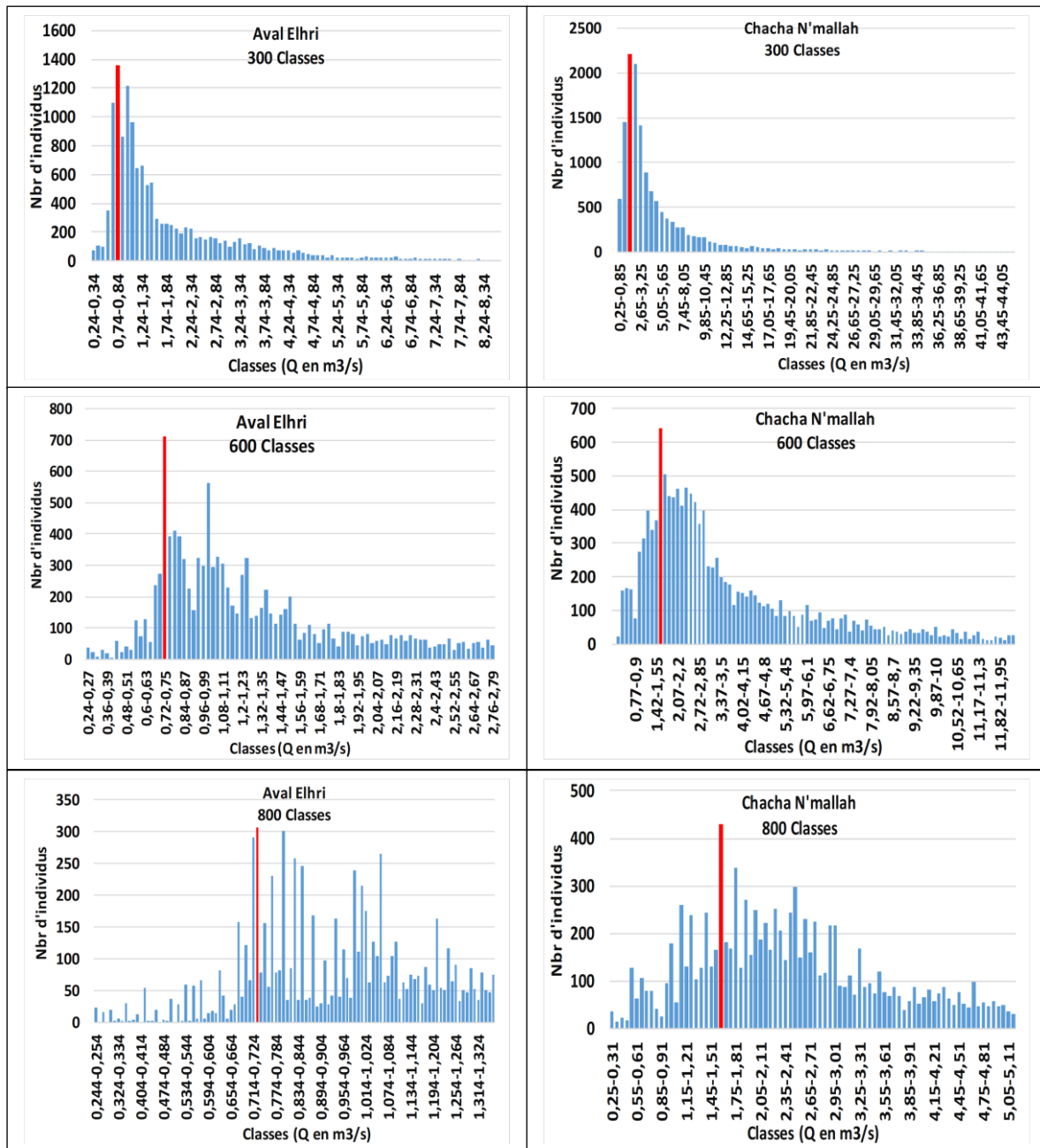


Figure 9-2: Evolution de l’histogramme de distribution des débits moyens journaliers et du nombre de classes imposé - station d’Aval Elhri et Chacha N’mallah (1976-2016)

Tableau 9-1:Variation des débits modaux en fonction des classes choisies pour les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

| | Classes | | | μ | σ | Cv |
|---|---------|------|------|-------|----------|--------|
| | 300 | 600 | 800 | | | |
| Aval Elhri (Q en m³/s) | 0,79 | 0,73 | 0,72 | 0,75 | 0,04 | 5,07 % |
| Chacha N'mallah (Q en m³/s) | 1,75 | 1,61 | 1,57 | 1,64 | 0,09 | 5,75 % |

Le débit modal de la station d’aval Elhri est de l’ordre de 0,73 m³/s et dans la station de Chacha N’mallah est de l’ordre de 1,61 m³/s. En termes de débit spécifique, le débit modal de la station d’Aval Elhri est plus important (2,76 l/Km²/s) que celui de la station de Chacha N’mallah (1,23 l/km²/s).

- **Débit modal et débits classés**

Les débits modaux du bassin versant de l’oued de Srou se situent entre les quantiles 80 et 90 % (Figure 9-4). Au niveau de la station d’Aval Elhri le débit modal correspond au débit dépassé, environ 317 jours par an. Dans le Srou il est dépassé en moyenne, environ en 302 jours par an. On retiendra donc que les débits modaux sont des valeurs largement inférieures aux modules..

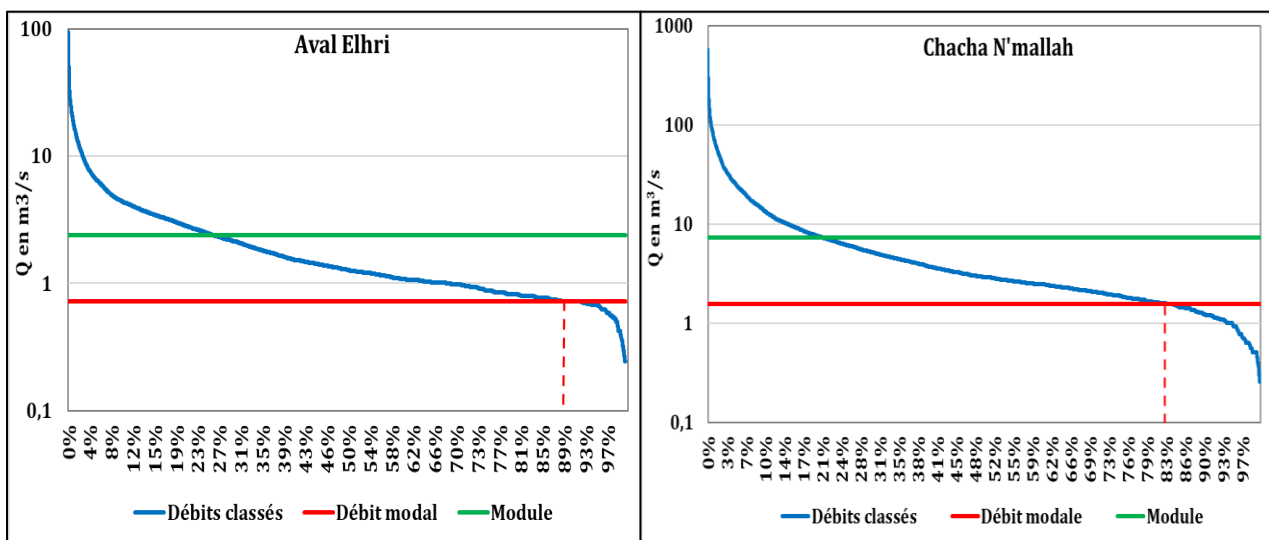


Figure 9-3:Le débit modal comparé aux débits caractéristiques des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

- *Fréquence de dépassement du débit modal*

L’application du débit modal comme seuil d’étiage sur les débits des stations du bassin versant de l’oued de Srou a montré que :

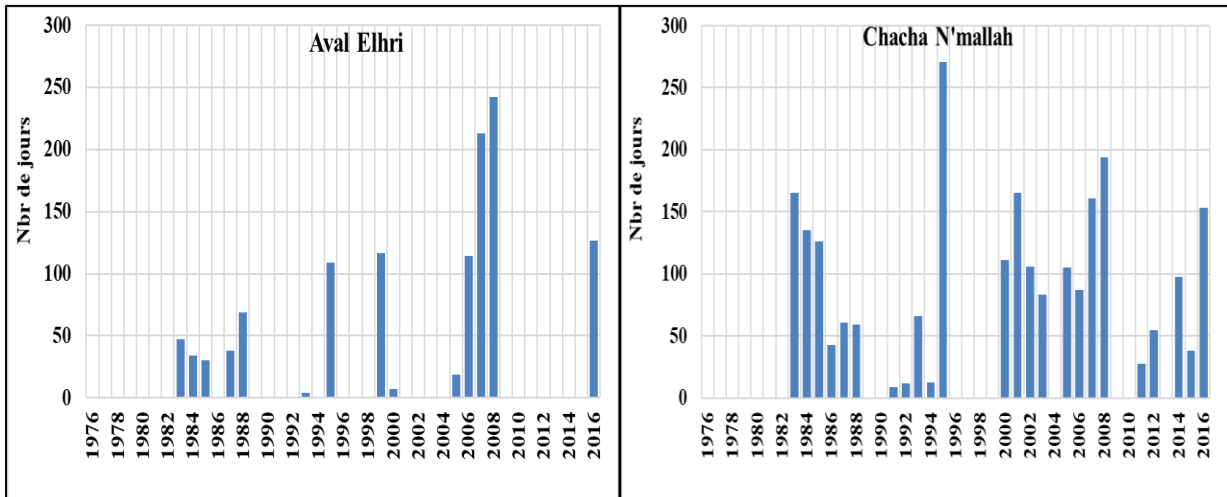


Figure 9-4: Variation des périodes d’étiages en fonction du seuil débit modal pour les stations d’Aval Elhri et de Chacha N’mallah (1976-2016)

14 ans des années de la chronique d’observation de la station d’Aval Elhri présentent des étiages, soit une fréquence de 35 %. Dans la station de Chacha N’mallah le nombre des années qui présentent un étiage augmente à 24 ans de la chronique, soit une fréquence de 61,5 %.

Les périodes d’étiage pour ce seuil varient d’une année à l’autre pour les deux stations du bassin. Mais la tendance globale est vers l’augmentation surtout dans les dernières années.

La moyenne des jours en dessous du débit modal est de 30 jours en Aval d’Elhri, alors que dans la station de Chacha N’mallah le moyenne est de l’ordre de 60 jours. Les plus longues périodes sont observées dans le Chbouka en 2007 et 2008, ils se de l’ordre de 213 et 243 jours. Ceci montre que plus de 68 % des débits de ces années sont en dessous des débits modaux. Dans la station de Chacha N’mallah les périodes d’étiages observées sont un peu plus longues. La plus longue période est enregistrée en 1995 elle est de l’ordre de 271 jours.

2.2. Débit d’entrée aux étiages dans le bassin versant de l’oued de Srou à partir du DC

On doit choisir un seuil parmi les débits caractéristiques, qui permet de définir l’entrer aux étiages dans le bassin du Srou. Le choix d’un seuil de bas débit doit répondre à certains critères: un seuil bas permet d’étudier les étiages les plus extrêmes ; malheureusement, un seuil trop bas pose un certain nombre de problèmes méthodologiques, car le débit risque de ne pas descendre sous le seuil pour de nombreuses années, conduisant à des étiages de durée/volume nuls. Choisir un seuil plus élevé permet de limiter ce problème, mais conduit à étudier des événements qui ne sont plus réellement extrêmes. Précisons également que nous souhaitons utiliser un seuil défini de manière identique pour toutes les stations, afin de permettre une comparaison pertinente entre les stations.

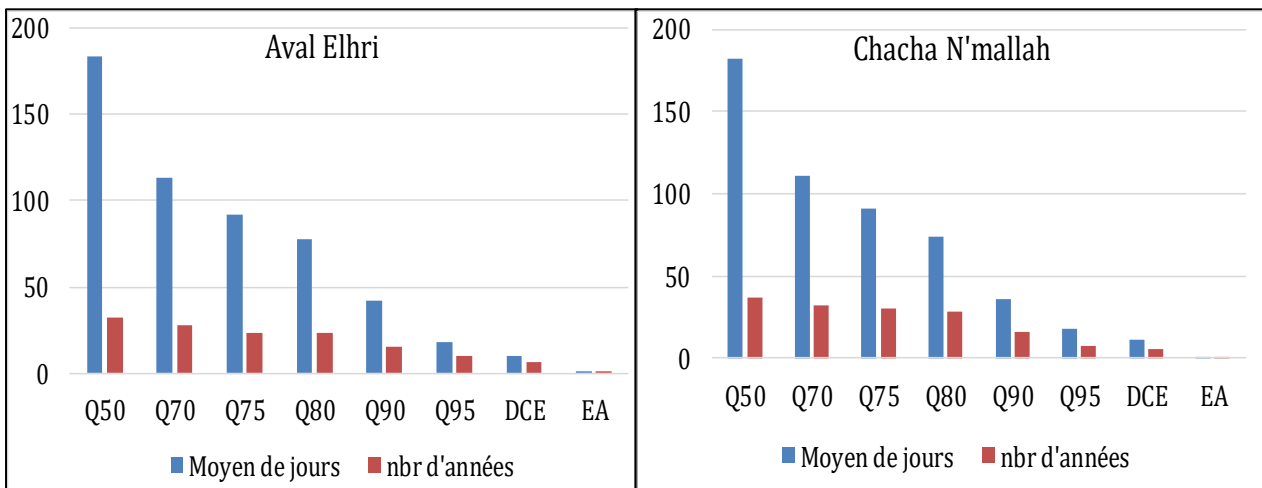


Figure 9-5:Années et jours d’étiages pour chaque seuil au niveau des stations d’Aval Elhri et Chacha N’mallah (1976-2016)

Pour seuil élevé comme le Q₅₀, on observe qu’un nombre important d’années présentent des étiages (32 ans sur les 41 ans d’observation au niveau de la station d’Aval Elhri). On note que pour ce seuil les périodes d’étiages sont très longues, la moyenne de ces périodes dans le Chbouka est de l’ordre de 180 jours. En revanche, pour un seuil plus bas comme le DCE (Q₉₇) le nombre d’années avec étiage diminue (6ans dans le Chbouka) ainsi les jours d’étiages (la moyenne pour ce seuil dans le Chbouka est de 10 jours).

Afin de caractériser le meilleur DC, qui caractérise la période d’étiage dans notre bassin. Nous avons adopté la démarche proposée par ONEMA en France en 2009 : pour plusieurs choix de seuil de bas débit (quantiles à 50, 70, 75,80, 90, 95 et 97% de la courbe des débits classés interannuelle), nous avons calculé

- P₀ = le pourcentage d’années sans étiage ;
- P₉₀ = le pourcentage d’années conduisant à un étiage de durée supérieure à 90 jours.

Une valeur élevée de P_0 indique que le seuil choisi est trop bas, alors qu'une valeur élevée de P_{90} indique un seuil trop élevé. Les résultats de cette étude sont présentés en figure pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou.

On peut observer que les seuils à 90, 95 et 97% sont clairement trop bas, puisqu'ils conduisent pour deux des stations (Aval Elhri et Chacha N'mallah) à un nombre important des années sans étiage. Le choix entre les autres seuils est plus délicat. On peut remarquer que les deux courbes se croisent en général au niveau du seuil Q_{75} pour la station d'Aval Elhri et Q_{80} pour la station de Chacha N'mallah, suggérant que le meilleur compromis se situe dans cette fourchette.

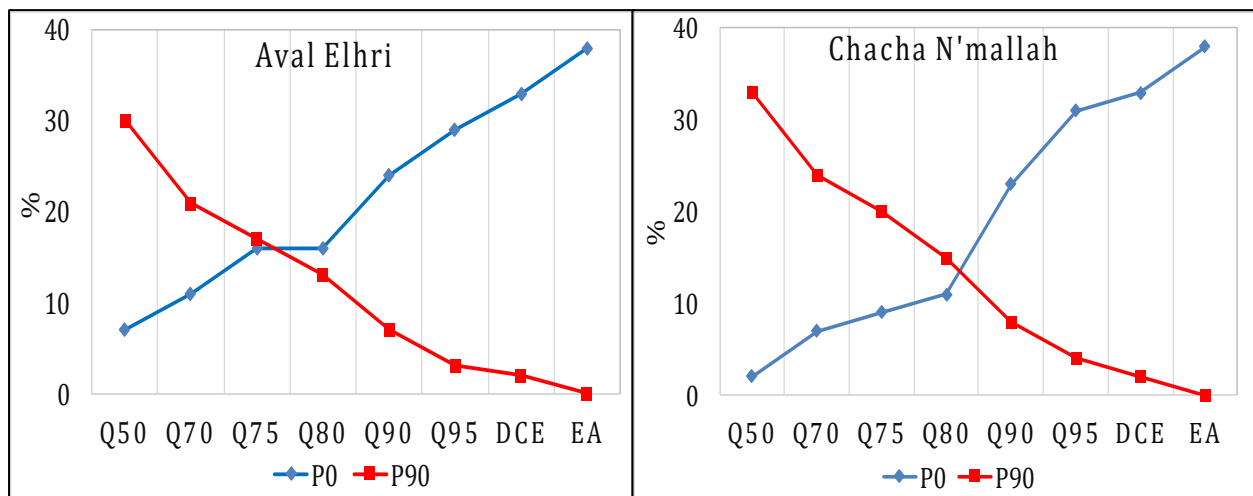


Figure 9-6: Pourcentage d'année sans étiage (en bleu) et année avec étiage supérieur à 90 jours (en rouge) en fonction du seuil choisi au niveau des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)

Nous optons pour un seuil commun défini comme le quantile à 75% de la courbe des débits classés interannuelle pour les deux stations d'Aval Elhri et la station de Chacha N'mallah.

Le débit limite donc d'étiage pour le sous bassin versant de l'oued du Chbouka est le $Q_{75}=0,89 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que dans le bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah est le $Q_{75}=1,86 \text{ m}^3/\text{s}$.

2. Définition des seuils d'étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou

Avant de commencer il faut faire la distinction entre les débits d'étiage et les débits caractéristiques d'étiage. Les débits caractéristiques sont en effet des valeurs déduites du traitement statistique des débits d'étiage (LANG, 2011). La plupart des seuils réglementaires fixés pour la gestion de l'eau en période de pénurie sont fondés sur ces débits caractéristiques

Sur la base de l'étude statistique des débits d'étiage réaliser dans le chapitre 7 et la définition des seuils international et national, nous allons essayer de proposer des niveaux ou seuils

d'étiages pour le bassin versant de l'oued de Srou. Les variables d'étiage ont été transformées en débits spécifiques (les débits fréquentiels des QMNA et des VCN, les DC et le débit modal) (Tableau 9-2).

Tableau 9-2:Résumé des indices d'étiage et retenus dans cette étude

| Indice | | Notation |
|--------------------|---|---|
| VCN | VCN7(2) | Volume Consécutif Minimal pour 7 jours de période de retour 2 ans |
| | VCN7(5) | Volume Consécutif Minimal pour 7 jours de période de retour 5 ans |
| | VCN7(10) | Volume Consécutif Minimal pour 7 jours de période de retour 10 ans |
| | VCN10(2) | Volume Consécutif Minimal pour 10 jours de période de retour 2 ans |
| | VCN10(5) | Volume Consécutif Minimal pour 10 jours de période de retour 5 ans |
| | VCN10(10) | Volume Consécutif Minimal pour 10 jours de période de retour 10 ans |
| | VCN30(2) | Volume Consécutif Minimal pour 30 jours de période de retour 2 ans |
| | VCN30(5) | Volume Consécutif Minimal pour 30 jours de période de retour 5 ans |
| | VCN30(10) | Volume Consécutif Minimal pour 30 jours de période de retour 10 ans |
| | VCN60(2) | Volume Consécutif Minimal pour 60 jours de période de retour 2 ans |
| | VCN60(5) | Volume Consécutif Minimal pour 60 jours de période de retour 5 ans |
| | VCN60(10) | Volume Consécutif Minimal pour 60 jours de période de retour 10 ans |
| | VCN90(2) | Volume Consécutif Minimal pour 90 jours de période de retour 2 ans |
| | VCN90(5) | Volume Consécutif Minimal pour 90 jours de période de retour 5 ans |
| VCN90(10) | Volume Consécutif Minimal pour 90 jours de période de retour 10 ans | |
| QMNA | QMNA (2) | Débit Mensuel Minimal Annuel de période de retour 2 ans |
| | QMNA (5) | Débit Mensuel Minimal Annuel de période de retour 5 ans |
| | QMNA (10) | Débit Mensuel Minimal Annuel de période de retour 10 ans |
| DC | DCE (Q97) | Quantile de fréquence au dépassement 97 issu de la CDC |
| | Q ₉₅ | Quantile de fréquence au dépassement 95 issu de la CDC |
| | Q ₉₀ | Quantile de fréquence au dépassement 90 issu de la CDC |
| | Q ₈₅ | Quantile de fréquence au dépassement 85 issu de la CDC |
| | Q ₈₀ | Quantile de fréquence au dépassement 80 issu de la CDC |
| | Q ₇₅ | Quantile de fréquence au dépassement 75 issu de la CDC |
| | Q ₇₀ | Quantile de fréquence au dépassement 70 issu de la CDC |
| | Q ₅₀ | Quantile de fréquence au dépassement 50 issu de la CDC |
| Débit Modal | | |

2.1. Cadre méthodologique

Nous allons essayer de classer les différents indicateurs d'étiage déjà obtenus dans l'analyse statistique. Le but est de déterminer celles qui caractérisent des situations extrêmes de celles qui identifie des situations plus ou moins normales. Les indicateurs retenus après transformations en débits spécifiques sont classés d'ordre croissant comme le montre les graphes de la figure (9-7).

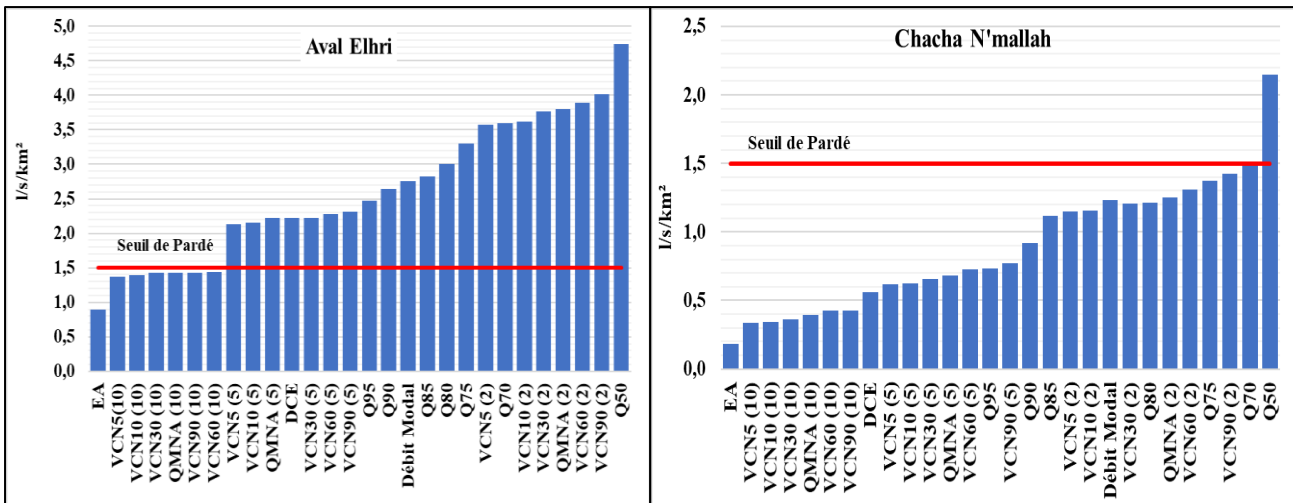


Figure 9-7 : Classification des indicateurs d'étiages pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou de plus important au plus faible (1976-2016)

Le graphique ci-dessous représente les indicateurs d'étiage obtenus et classés en ordre croissant pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou, qui sont comparés au seuil de PARDÉ (1963) fixé à 1,5 litre/s/km². Pour la station d'Aval Elhri, 76 % des indicateurs d'étiages sont en dessus de cette limite fixée par PARDÉ. Ce qui montre que ce seuil caractérise bien les situations sévères dans ce sous bassin versant. En effet en dessous de cette limite on trouve seulement : le VCN7 (10), le VCN10(10), VCN30(10), VCN60(10) et les VCN90 (10). Le seuil de PARDÉ peut donc être considéré comme un seuil très bas pour la station d'Aval Elhri, puisqu'il est réservé aux événements de rareté extrême. Alors qu'au niveau de la station de Chacha N'mallah, tous les indicateurs sont en dessous de ce seuil, sauf le Q₅₀. Ce qui montre que le bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah est moins soutenu en période d'étiage, et il connaît des étiages sévères dans la plupart des temps. Cette différence entre ces deux stations s'explique par la diversité des caractéristiques du substratum entre les deux bassins versant d'étude.

On observe des similitudes entre les débits d'étiages de chaque station du bassin versant de l'oued de Srou. Cette caractéristique est déjà mentionnée dans la bibliographie. Le manuel d'estimation et de prédiction des débits d'étiage réalisé par la WMO (GUSTARD, DEMUTH, 2008) souligne par exemple la similitude, en climat tempéré, entre le VCN7 et le Q₉₅. Il est à noter que le Q₅₀, est peu liés aux indicateurs d'étiage sévère, il présente une valeur assez importante par rapport aux autres indicateurs.

Les graphiques (Figure 9-7) permettent d'observer la proximité de certaines valeurs et amènent plusieurs remarques. Sur la base de cette remarque nous allons essayer de regrouper les indicateurs qui sont très proches. Mais le problème qui se pose, c'est quelle règle on doit respecter pour classer ces indicateurs ?

Nous avons essayé les célèbres méthodes qui permet de réaliser cette classification, mais le problème c'est que ces techniques demandent un nombre important de stations (aux moins trois stations), on note par exemple la méthode ACP (Analyse en Composantes Principales). Cette technique permet la visualisation des corrélations entre les variables, afin d'identifier des groupes homogènes d'observations. La technique CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) qui est une méthode de classification qui présente l'avantage de visualiser le regroupement des données sous forme de dendrogramme et donne une idée sur le nombre de classes dans lesquelles les données peuvent être regroupées.

Nous allons procéder donc au regroupement visuel. Pour renforcer ce classement on a essayé de regrouper les indicateurs qui présentent les faibles coefficients de variation (Cv). Dans la station d'Aval Elhri nous pouvons observer quatre classes similaires :

- 1^{ère} groupe : ressemble les Q_{70} , VCN90(2), VCN60(2), VCN10(2), Q_{75} , QMNA2 et VCN5(2),
- 2^{ème} groupe : on trouve les Q_{80} , Débit modal, Q_{85} et Q_{90} .
- 3^{ème} groupe : rassemble les Q_{95} , VCN90(5), VCN60(5), QMNA5, VCN30(5), DCE VCN10(5) et VCN5(5)
- 4^{ème} groupe : on trouve les VCN90(10), VCN60(10), QMNA10, VCN30(10), VCN10(10) et les VCN5(10).

Dans la station de Chacha N'mallah nous pouvons regrouper les indicateurs d'étiage en quatre groupes aussi :

- 1^{ère} groupe : ressemble les Q_{70} , VCN90(2), Q_{75} , VCN60(2)
- 2^{ème} groupe : on trouve les QMNA2, Q_{80} , VCN30(5), Débit modal, VCN10(2), VCN5(2), Q_{85} et Q_{90} .
- 3^{ème} groupe : rassemble les VCN90(5), Q_{95} , VCN60(5), QMNA5, VCN30(5), VCN10(5), VCN5(5) et le DCE
- 4^{ème} groupe : on trouve les VCN90(10), VCN60(10), QMNA10, VCN30(10), VCN10(10) et les VCN5(10).

2.2. Résultats et interprétations

La première observation que nous pouvons tirer de la classification précédente c'est que le débit modal ne peut pas être choisi dans le bassin versant de l'oued de Srou comme débit d'entrée aux étiages. Il prend des valeurs plus faibles et proche des Q_{80} . Donc, Le choix précédent du

Q_{75} comme débit d'entrée semble satisfaisant. Les quatre niveaux sont les suivants (Figure 9-8 et 9-9) :

- **Niveau de vigilance** : il correspond à l'entrée aux étiages, après le dépassement du Q_{75} (3,30 l/s/km² au niveau de la station d'Aval Elhri et 1,376 l/s/km² dans la station de Chacha N'mallah), d'autres indicateurs peuvent être retenus aussi pour caractériser l'entrée aux étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou, il s'agit de Q_{70} , VCN90(2), VCN60(2). À ce niveau, des mesures de communication et de sensibilisation à l'économie d'eau doit être mis en place, sans pour autant que des mesures de limitations soient prises ;
- **Niveau d'alerte** : ce stade commence après le franchissement de la seuil Q_{85} . Il correspond dans la station d'Aval Elhri au débit 2,82 l/s/km² et dans la station de Chacha N'mallah au débit 1,11 l/s/km². Ce niveau, associé au Débit d'Objectif d'Etiage, doit être garanti au moins 8 années sur 10 et doit assurer le bon fonctionnement du milieu aquatique. A ce niveau, les premières limites d'usages de l'eau doivent être prises. D'autres indicateurs peuvent être retenus aussi pour caractériser le niveau d'alerte dans le bassin versant de l'oued de Srou à titre d'exemple : le débit modal, Q_{80} et Q_{90} ;
- **Niveau de crise** : ce niveau correspond au franchissement du DCE, il correspond au dans la station d'Aval Elhri au débit de 2,23 l/s/km² et dans la station de Chacha N'mallah au débit 0,56 l/s/km². A ce stade l'alimentation en eau potable et la survie de certaines espèces sont mises en danger. Un renforcement des mesures de limitations de prélèvements, voire des suppressions de certains usages sont mis en place enfin de ne pas atteindre le niveau de débit de crise renforcée. D'autres indicateurs peuvent être retenus aussi pour caractériser le niveau de crise dans le bassin versant de l'oued de Srou à titre d'exemple : VCN90(5), Q_{95} , VCN60(5), VCN30(5), VCN10(5), VCN5(5) et le QMNA5 ;
- **Niveau de crise renforcée** : cette situation est arrivée après le dépassement de la QMNA10. Elle correspond dans la station d'Aval Elhri au débit de 1,42 l/s/km² et dans la station de Chacha N'mallah au débit 0,393 l/s/km². Ce niveau doit garantir la survie des espèces aquatiques et l'alimentation en eau potable. A ce niveau-là, un arrêt total des prélèvements doit être pris. Les autres indicateurs qui peuvent caractériser cette situation sont : VCN90(10), VCN60(10), VCN30(10), VCN10(10) et les VCN5(10).

On note que ces niveaux sont établis de manière subjective sur la base des comparaisons entre les indices d'étiages dans les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou, ces résultats sont donc un essai. Pour définir des seuils avec une échelle fine, il est important de réaliser une étude des différents écosystèmes aquatiques, ces besoins et de définir les volumes prélevables

pour l'ensemble des usagers de l'eau, en s'appuyant sur un diagnostic quantitatif le plus précis possible de la ressource et des usages.

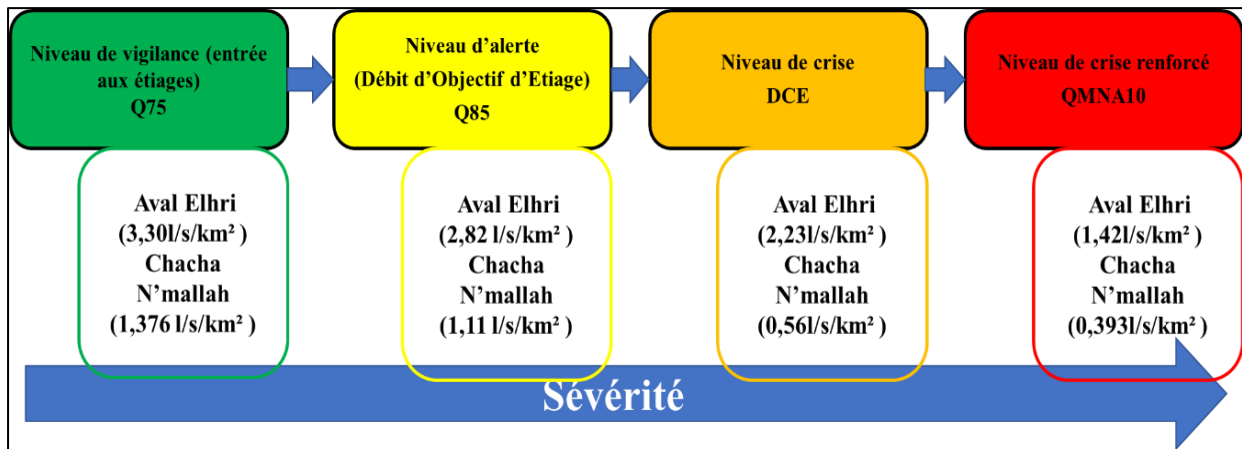


Figure 9-8 : Seuils d'étiages pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou

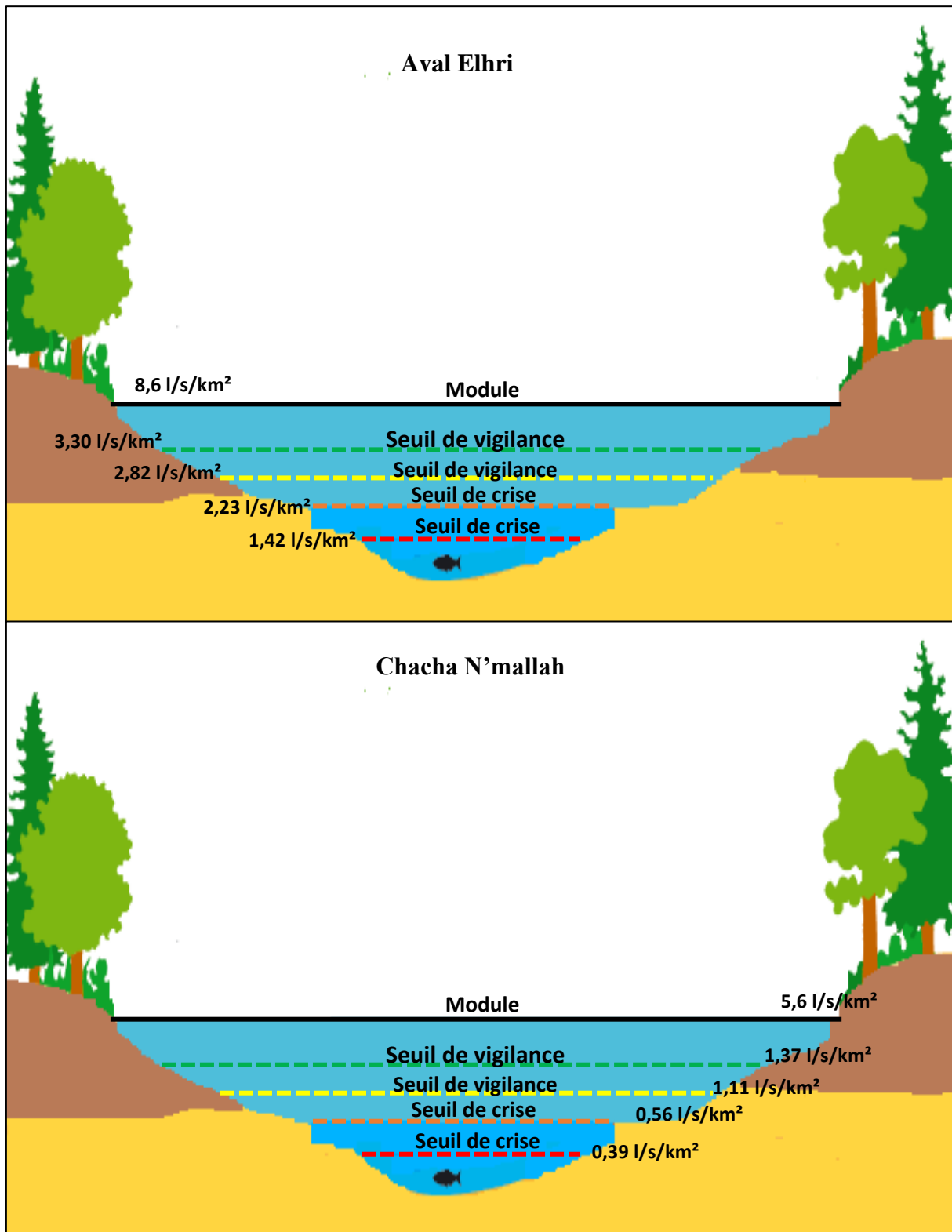


Figure 9-9 : présentation des différents seuils d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou

Axe 25 : Identification des étiages sévères en fonction des durées et des volumes déficitaires dans le bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

La région du bassin versant de l’oued de Srou connaît des situations d’étiage très sévères qui entraîne de très faibles débits et parfois un assèchement du cours d’eau. Les étiages sévères peuvent être causés par des sécheresses prolongées ou par un pompage excessif des eaux, les deux facteurs étant parfois combinés. La sévérité des étiages est déterminée à partir des débits journaliers inférieurs au seuil d’étiage.

1. Dépassement des seuils d’étiages dans le bassin versant de l’oued de Srou pour la période 1976-2016

Dans le but de déterminer la sévérité des étiages vécu dans le bassin versant de l’oued de Srou, nous allons calculer le nombre des jours qui enregistrent des débits en dessous du seuil choisi. Les graphes de la figure (9-10) représentent les résultats obtenus pour chaque station du bassin versant.

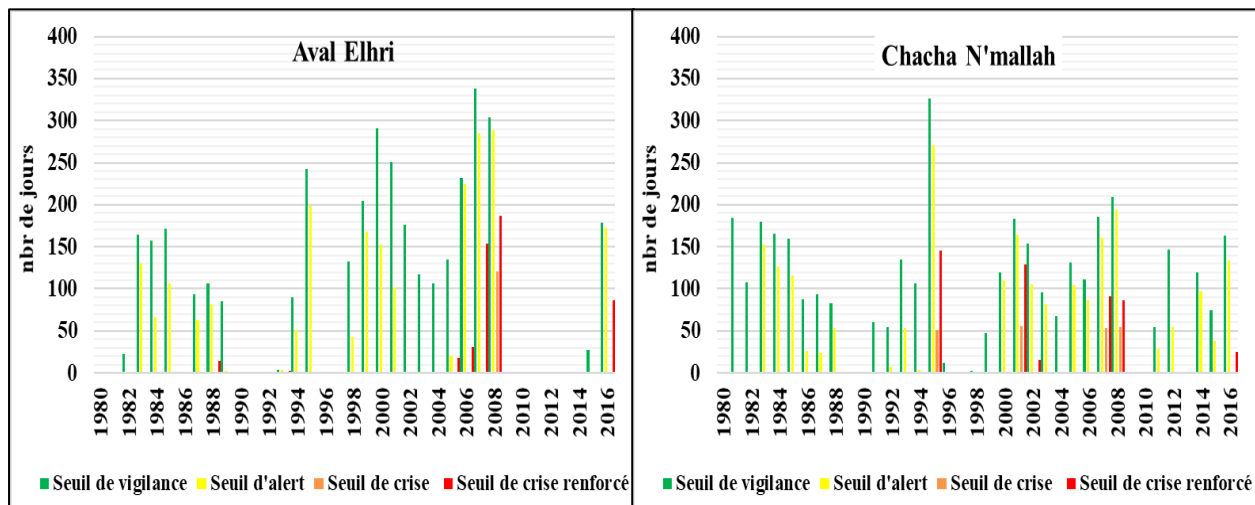


Figure 9-10 : Nombre des jours en dessous des seuils pour les stations du bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

Le comportement des deux stations du bassin versant de l’oued de Srou n’est pas le même vis-à-vis les étiages, en termes d’apparition ou en termes de durée en dessous des seuils. En effet, la station de Chacha N’mallah enregistre un nombre important des périodes d’étiage avec des durées un peu long par rapport à la station d’Aval Elhri.

Le seuil d’alerte est dépassé dans 23 ans des années de la chronique (56 %) dans la station d’Aval Elhri avec une durée moyenne de 94 jours, alors qu’il est dépassé dans 30 ans dans la station de Chacha N’mallah (73 %), avec une durée moyenne de 93 jours.

Les situations extrêmes, en dessous de la QMNA10, ont beaucoup de chances de se produire dans la station de Chacha N'mallah. Ils sont apparus dans cinq années de la chronique, il s'agit des années 1995 avec une durée de 51 jours, en 2001 avec 56, en 2007 avec 53 jours et en 2008 avec 55 jours en dessous du seuil. Dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka en Aval d'Elhri, la situation est moins sévère. Les débits ont dépassé le seuil de crise renforcé une seule fois durant la chronique d'étude. Il s'agit de l'année 2008, dont laquelle les débits sont inférieurs à ce seuil pendant 121 jours.

2. Identification du périodes déficitaires et quantification du déficit par la méthode SPA

Contrairement aux variables annuelles, cette catégorie de variable est basée sur l'identification d'événements d'étiage, définis comme des périodes durant lesquelles le débit est resté inférieur à un seuil donné. Ces indices mesurent donc la durée moyenne ou maximale, ainsi que le déficit moyen ou maximal, de l'événement durant lequel le cours d'eau est considéré en étiage, c'est-à-dire lorsque les débits sont inférieurs à un débit seuil fixé. Le choix de la valeur seuil dépend de l'objectif de l'étude. Le volume et la durée des étiages des cours d'eaux constituent une information indispensable à la conception des structures et la gestion des ressources hydriques.

2.1. Méthodologie

Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour la caractérisation des étiages en termes de durée et de déficit. On note la méthode « theory of run » proposé par YEVJEVITCH (1967). Le principe consiste à définir l'étiage en tant qu'événement par rapport à un seuil de débit appelé Q_0 en deçà duquel le cours d'eau est considéré en étiage. La procédure de la méthode consiste donc à identifier, à partir de la chronique des débits moyens journaliers, les séries consécutives d'observations inférieures ou égales au seuil fixé (Figure 9-11). La présente méthode est déjà utilisée dans l'identification des étiages par BERAN ET GUSTARD (1977), INSTITUTE OF HYDROLOGY (1980), ZELENHASIC ET SALVAI (1987), EL-JABI ET AL (1996), SMATHKIN ET WATKINS (1997).

Les informations tirées de chaque événement identifié sont les dates de début (t_0) et de fin (t_f) de l'événement, sa durée ($d = t_f - t_0$), ou encore le déficit de volume V écoulé par rapport au seuil c'est à dire le cumul des différences entre le seuil et le débit observé. Dans certaines études on peut trouver l'utilisation de la valeur du débit minimal (Q_{\min}) de l'événement ou encore aux différentes dates pour lesquelles un certain pourcentage du déficit de volume total est atteint, par exemple le t_{50} sera la date à laquelle la moitié du déficit est atteint. Parfois le rapport entre

le déficit de volume et la durée est pris comme indicateur synthétique de la magnitude de l’étiage (CATALOGNE, 2012).

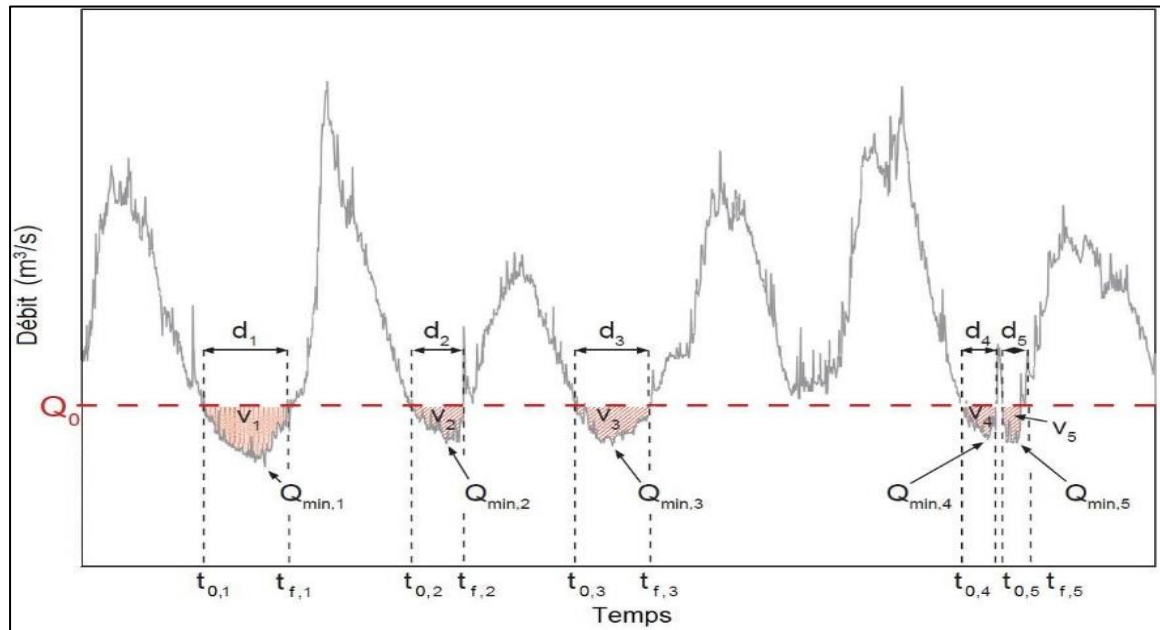


Figure 9-11: Illustration de la détection d'épisodes d'étiage vis-à-vis d'un seuil. Figure modifiée d'après Fleig et al. (2005).

Une autre méthode est proposée dans le but de dépasser l'interruption des épisodes d'étiages à la suite d'événements pluvieux isolé, dite : « Sequent Peak Algorithm » (SPA). Cet algorithme a été développé par VOGEL ET STEDINGER (1987) pour le dimensionnement des réservoirs, puis elle est reprise par TALLAKSEN ET AL. (1997) puis KJELDSSEN ET AL. (2000) dans le cadre de la caractérisation des étiages. Le principe est de considérer chaque jour le déficit cumulé S_t par rapport à un niveau de remplissage attendu Q_0 . Un épisode d'étiage débute lorsque le débit observé Q_t à l'instant t est insuffisant pour atteindre Q_0 et perdure tant que $w(t) = Q_0 - (Q_t + w_{(t-1)})$ reste positif, c'est à dire tant que le déficit accumulé n'est pas résorbé (Figure 9-12).

Les variables dérivées de cette technique sont le déficit cumulé maximal (W_{max}) et la durée entre le début de l'épisode d'étiage et l'instant où celui-ci atteint son déficit cumulé maximal (d). Cette approche nous a paru être la plus avantageuse dans la mesure où la sélection d'un unique épisode chaque année (le plus important) permettra de limiter fortement les problématiques de dépendance évoquées plus haut.

Le problème qui demeure dans ces deux techniques citées précédemment c'est le choix du débit seuil. Ce choix dépend avant tout de l'objectif de l'étude mais il reste le plus souvent arbitraire. Dans de nombreux cas le seuil est déterminé pour l'ensemble de la chronique sur la base d'un quantile de la courbe de débits classés interannuelle (généralement compris entre Q_{70} et Q_{95}) (CATALOGNE 2012), plus rarement par rapport à un pourcentage du débit moyen

interannuel (MATHIER ET AL. (1992), CLAUSEN ET PEARSON (1995)). Nous allons donc choisir le seuil d’entrée aux étiages dans le bassin versant de l’oued de Srou Q_{75} pour caractériser les périodes d’étiages par la méthode SPA.

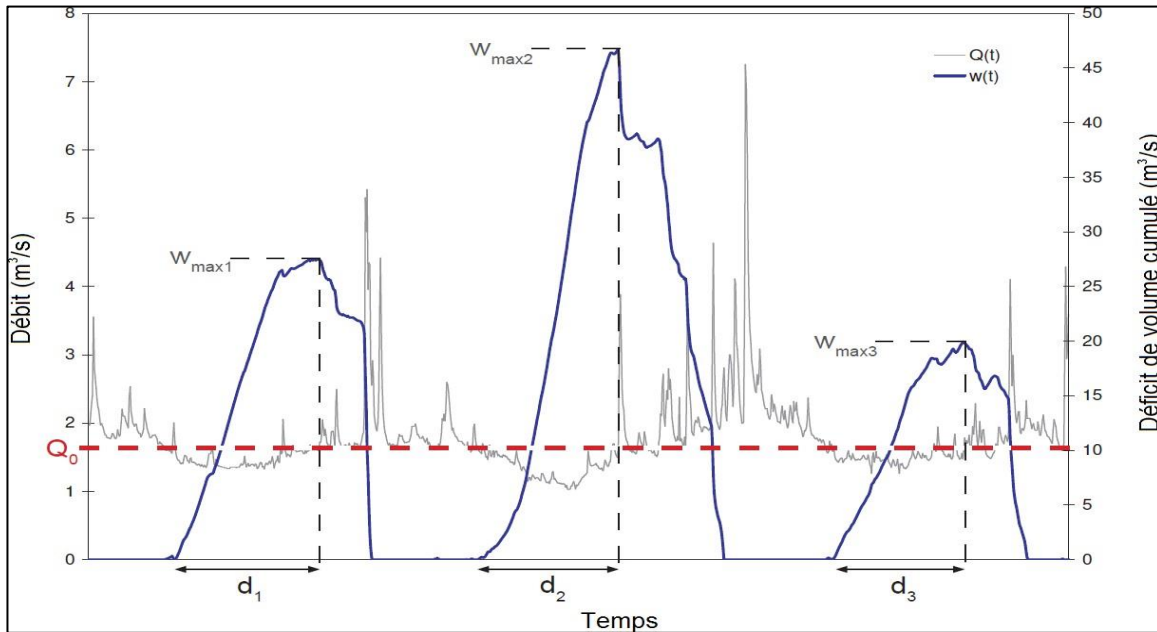


Figure 9-12: Définition des épisodes d’étiage selon la procédure « Sequent Peak Algorithm ». Figure modifiée d’après Fleig et al. (2005).

2.2. Résultats

La figure (9-13) montre l’application du filtre SPA sur la période d’étude (1976-2016) pour les deux stations du bassin versant de l’oued de Srou. Les périodes durant lesquelles la série filtrée est nulle correspondent aux périodes de débits soutenus. Inversement, les événements d’étiages correspondent à des valeurs de SPA positives.

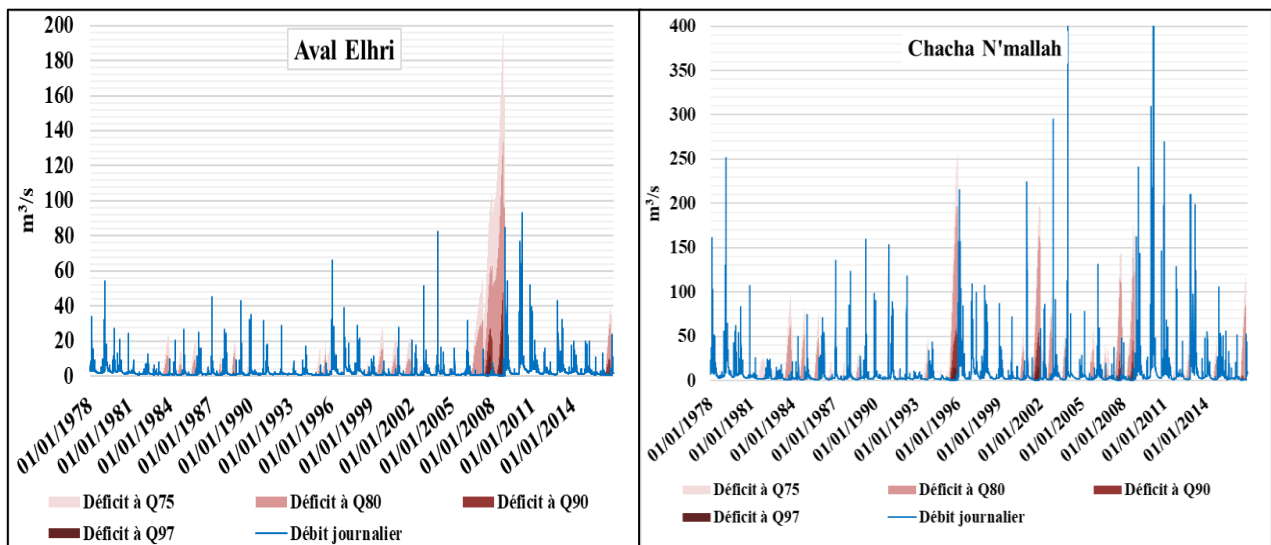


Figure 9-13: Définition des épisodes d’étiage selon la procédure « Sequent Peak Algorithm » pour les stations du bassin versant de l’oued de Srou (1976-2016)

Ce filtre possède donc la particularité intéressante d'« inverser » l'hydrogramme, les plus fortes valeurs correspondant aux étiages les plus sévères. L'inconvénient de ce filtre est sa sensibilité aux données manquantes, du fait de sa définition récursive (Figure9-12). Il a ainsi été choisi d'extraire de chaque chronique d'étude les durées et déficits maximaux annuels en considérant le seuil $Q_0=Q_{75}$.

La station de Chacha N'mallah présente un nombre important des épisodes d'étiages, avec 39 épisodes, d'une durée variable. La plus longue est observée entre le 24/12/1994 et le 08/01/1996, ce qui fait 380 jours en dessous du seuil proposé. Le volume déficitaire le long de cette période dépasse 132 millions de m^3 . En général, les années qui connaissent des périodes d'étiages sont les années les plus sèches de la chronique d'étude et la durée moyenne des épisodes est de 116 jours.

Au niveau de la station d'Aval Elhri la situation est moins sévère, seulement 26 épisodes d'étiage est observées, avec une durée moyenne de 161 jours. La période la plus longue et la plus sévère est enregistrée entre 18/05/2006 et 14/12/2008 avec un volume déficitaire de 271 millions de m^3 .

Les résultats obtenus par cette méthode confirment celles obtenus par les autres indicateurs de caractérisations des étiages déjà détaillé dans les chapitres précédents, en ce qui concerne les années qui enregistre les étiages les plus sévère du chronique (l'année 1995 au niveau de Chacha N'mallah et 2007 en Aval d'Elhri).

Conclusion du chapitre 9

Dans le présent chapitre nous avons montré la faiblesse des législations nationales en matière de gestion des étiages. Cependant, à l'échelle internationale nous avons trouvé plusieurs lois et textes d'applications, qui organisent la gestion de ces situations. Ces législations sont différentes d'un bassin à l'autres.

Le choix du débit d'entrée aux étiages dans le bassin est fixé sur le Q_{75} . Le travail que nous avons réalisé en matière de définition de seuils pour le bassin versant de l'oued de Srou reste un simple essai qui se fonde sur des analyses statistiques. Notons que la définition des seuils ne peut pas être basée uniquement sur les résultats d'une analyse statistique. La détermination des fréquences de retour ne suffit pas à définir la sévérité d'une situation ou à fixer des seuils d'étiage, car il faut intégrer les activités humaines et les besoins du milieu naturel. Donc, les niveaux d'étiage doivent être définis en fonction des enjeux économiques et environnementaux.

L'analyse de la sévérité des étiages a montré deux périodes très déficitaires avec des durées et de volumes très importantes. Il s'agit de l'année 1995 dans la station de Chacha N'mallah et l'année 2008 pour la station d'Aval Elhri.

Chapitre 10 : Etiage et qualité des milieux naturels dans le bassin versant de l'oued de Srou : Suivi, mesure et analyse (2016-2019)

Introduction du chapitre 10

Axe 26 : Quantification et organisation de la ressource en eau en période d'étiage (2016-2019).

Axe 27 : Impact des étiages sur la qualité du milieu dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)

Conclusion du chapitre 10

Introduction du chapitre 10

Depuis longtemps, les enjeux liés au problème de pénurie en eau étaient principalement liés aux activités humaines, notamment l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation, la production d'énergie et les activités touristiques... Aujourd'hui, les plans de gestion des ressources en eau intègrent des enjeux environnementaux. En effet, les écosystèmes aquatiques sont très sensibles au stress causé par les périodes des étiages. Les conditions de vie de divers organismes sont soumises à des perturbations importantes qui conduisent souvent à une augmentation de la température et/ou à une modification des conditions chimiques de l'eau. Les activités humaines, à travers les processus de captage d'eau et de rejet d'effluents dans l'environnement, sont l'un des principaux facteurs exacerbant tous ces phénomènes.

Donc, la bonne gestion de la ressource en eau doit se baser sur une connaissance précise et localisée du disponible d'eau, en particulier en période des étiages dans le but de répondre aux besoins.

Dans le présent chapitre, nous essayons de quantifier quantitativement et qualitativement la ressource en eau dans le bassin versant de l'oued de Srou à une échelle plus fine. En effet, les stations hydrométriques qui existent contrôlent des espaces très vastes, les stations de Chacha N'mallah et d'Aval Elhri contrôlent respectivement une superficie de 1374 km² et 331 km², ce qui ne permet pas de mesurer la vraie ressource en eau disponible, ni de caractériser les sous bassins qui alimentent et garantissent l'écoulement pour l'ensemble du bassin. La méthodologie adoptée rassemble à la fois les campagnes de jaugeages et les campagnes de mesures de la qualité physique des eaux de surfaces.

Axe 26 : Quantification et organisation de la ressource en eau en période d'étiage (2016-2019)

Les écoulements de surface sont le résultat des processus hydrogéologiques souterrains, des variations spatio-temporelles des entrées météorologiques et des caractéristiques physiographiques du bassin. Généralement, la gestion de la ressource en eau s'appuie sur les données des stations hydrométriques et pluviométriques qui sont très lâches, du fait des erreurs et des lacunes observées dans les annuaires des stations ainsi la majorité des stations sont implantées dans les exutoires des bassins et contrôlent de grandes superficies. D'autre part, le bassin versant n'est pas adapté à la prospection de la ressource en eau dans la mesure où les sous-bassins présentent des structures géologiques, lithologiques et topographiques diversifiées, ainsi les débits globaux mesurés aux stations seront le résultat de plusieurs aquifères. Ces derniers ne réagissent pas de la même façon, en particulier pendant les périodes des étiages.

1. Objectifs du travail

L'objectif principal de ces campagnes est la connaissance du fonctionnement hydrologique réel des sous bassins de l'oued de Srou en période des étiages et l'extraction des coefficients de tarissements des différentes aquifères qui les alimentent. Ainsi, des objectifs secondaires sont associés à l'étude, on note :

- La quantification de la ressource en eau disponible dans les sous-bassins de l'oued de Srou.
- Prolongation de la chronique d'observation des séries hydrologiques (1976-2016) avec quatre années d'observations.
- Validation des données hydrologiques par des campagnes de jaugeages.
- Création des courbes de tarages pour chaque sous-bassin dans le but d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique.

2. Cadre méthodologique

On sait de quoi est constitué le sol de la lune, on ne connaît qu'à peu près bien les débits de la Seine à Paris (ALDEGHERI, 1979). En effet, les études hydrologiques récentes cherchent à exploiter la donnée hydrologique disponible des services hydrologiques. Alors que les changements climatiques ainsi la rareté de la ressource en eau surtout dans les pays arides et semi-arides nécessite une connaissance pointue de cette ressource. Notre travail consiste à produire des données hydrologiques à une échelle très grande, on zoome dans le bassin versant vers des unités plus petites et homogènes dites bassins unitaires. Nous avons essayé de

subdiviser le bassin versant de l'oued de Srou ont des petites sous bassins, dont chacun va être mené d'une échelle limnimétrique. Au niveau de ces points, dites stations, on va effectuer des campagnes de jaugeages entre 2016 et 2019.

Une méthode est adoptée au sein de ce travail, déjà utilisée par l'agence du bassin Rhin-Meuse en nord-est de la France dans le but de la réalisation du catalogue des débits d'étiages (FRANÇOIS, SARY, 1994). Les données de cette méthode sont reprises par LEBAUT vers la fin des années 90 pour extraire les paramètres de l'écoulement souterrain en milieux poreux sur des formations grésos-sableuse (LEBAUT, 2000). La même démarche est déjà utilisée au Maroc dans un contexte climatique semi-aride qui est le haut Sbou (DEVOS ET NEJJARI, 1998) et (QADEM, 2014).

Pour que les débits mesurer lors des campagnes de jaugeages renseignent sur les propriétés des aquifères, il est important de mesurer sur des sous bassins de lithologie homogène avec un régime des basses eaux stables : il s'agit donc de prendre ces mesures en des périodes où les écoulements ne sont pas directement influencés par des précipitations. Ces périodes correspondent aux périodes de tarissement des aquifères dont l'écoulement dépend directement et reflètent le débit de base de la nappe.

Les mesures seront réalisées dans des situations hydrologiques stabilisées au niveau des exutoires des bassins unitaires. Les campagnes de jaugeages doivent être transcrites dans le temps dans le but d'avoir une idée instantanée sur l'écoulement global dans l'ensemble du bassin versant. Les écoulements seront déduits à partir des mesures de la vitesse d'eau par un micro-moulinet.

2.1. Choix des points de mesure

Les points de mesures sont choisis en fonction de l'homogénéité des sous-bassins ainsi en fonction de la continuité des écoulements surtout en périodes des basses eaux. Les visites de terrains réaliser entre février et juin 2016 dans le bassin versant de l'oued de Srou, ont permis de caractériser seulement trois sous bassins qui gardent un écoulement permanent. Ces sous bassins sont : le sous bassin de l'oued de Chbouka, le sous bassin d'Assif Tamharrart et le sous bassin d'Assif N'douma. Les sous bassins ont lithologie particulièrement homogène sur une superficie variable (Tableau 10-1).

Tableau 10-1: Caractéristiques géologiques des sous bassins du bassin versant de l'oued de Srou avec écoulement pérenne

| Sous bassin | Superficie (km ²) | Lithologie dominante | Perméabilité |
|------------------|-------------------------------|------------------------|--------------|
| Assif Tamharrart | 41 | Argile rouge | Imperméable |
| Assif Ndouma | 85 | Calcaire | Perméable |
| Chbouka | 331 | Calcaire et le dolomie | Perméable |



Figure 10-4: Photo d'Assif Tamharrart vide en mois de janvier 2016



Figure 10-4: Photo d'oued Arrogo vide en janvier 2016



Figure 10-2 : Ecoulement de l'oued Assif Tamharrart en mois de juin 2016



Figure 10-2: Ecoulement de l'oued Assif N'douma en mois juin 2016

Dans le cours d'eau principal, nous avons choisi quatre points. Le premier point est en amont le plus accessible qui permet un suivi facile, à ce point-là l'oued de Srou prend son appellation. Alors que le deuxième point est situé en aval de la confluence avec l'affluent Assif Tamharrart (amont du pont de Lkbab) alors que le troisième est en aval de la confluence (aval du pont de Lkbab). Le dernier point est fixé en aval le non anthropisé, avant les carrières qui modifient d'une façon permanente le lit du cours d'eau et perturbent l'écoulement par la construction des petits barrages pour stocker de l'eau, ce point aussi est situé en aval de la zone la plus peuplée du bassin versant de l'oued Srou, deux agglomérations à caractère urbaines

jettent des quantités importantes des eaux usées dans l'oued de Srou, ces eaux perturbent l'écoulement. Les points ainsi choisis sont représentés sur la carte (Figure 10-5).

Dans le but de faciliter la représentation graphique des points de jaugeages, nous avons utilisé la codification suivante : les points de jaugeages sont codifiés par des lettres majuscules tirées des initiales de l'oued de Srou et de ses affluents (Tableau 10-2).

Tableau 10-2: Cordonnées et codification des points de jaugeages

| Point de jaugeage | Code | X (m) | Y (m) | Z (m) |
|------------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Affluent Assif Tamharrart | AAT | 494967 | 241691 | 1188 |
| Affluent Assif Ndouma | AAN | 483233 | 241375 | 965 |
| Affluent Chbouka | ACH | 478655 | 251486 | 932 |
| Oued Srou Amont | SAM | 505615 | 250393 | 1507 |
| Oued Srou Amont pont Lakbab | SAMPK | 499688 | 240418 | 1373 |
| Oued Srou Aval pont Lakbab | SAVPK | 488814 | 241000 | 1180 |
| Oued Srou Aval | SAV | 480003 | 242284 | 923 |

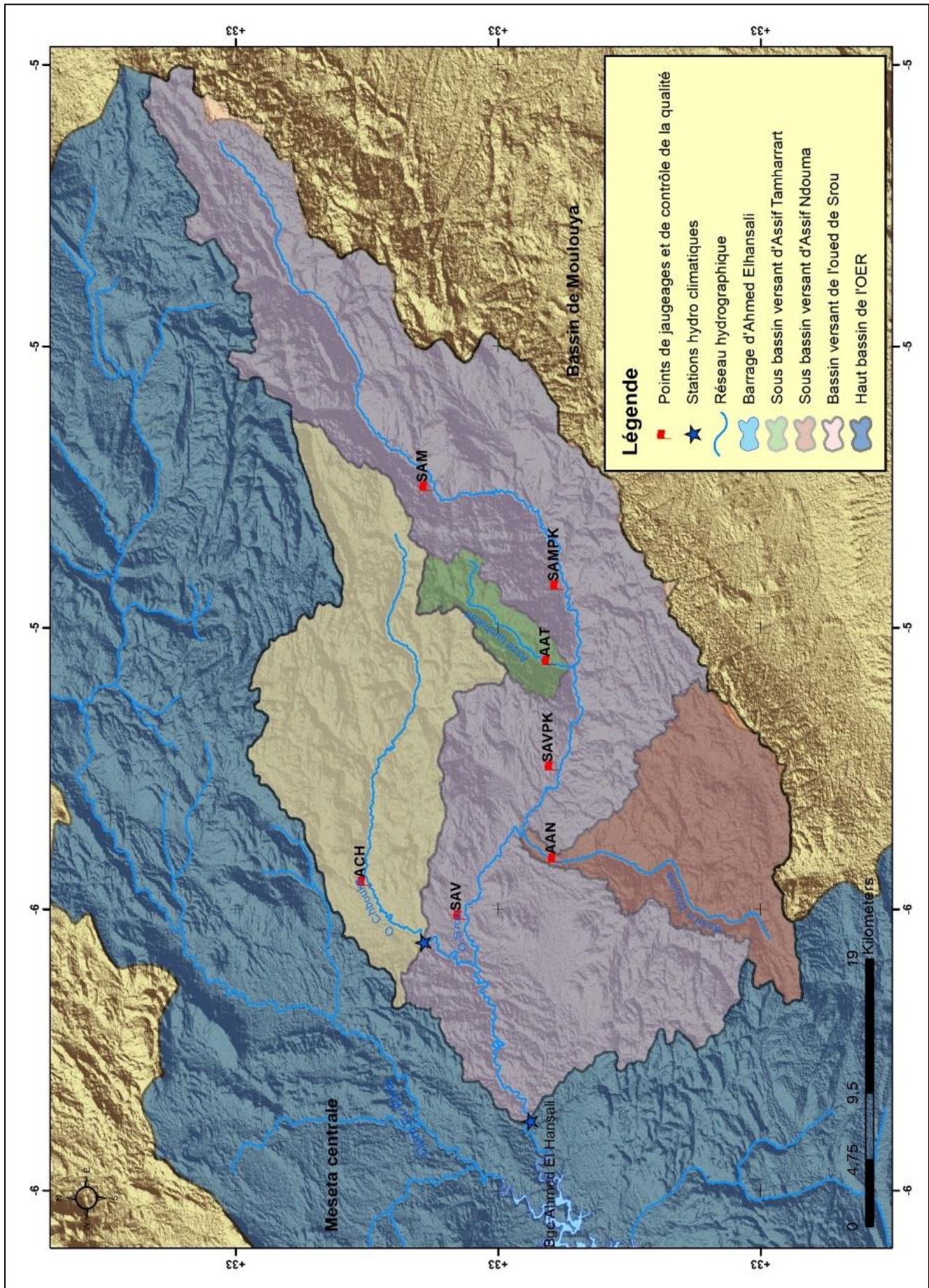


Figure 10-5: Localisation des points de jaugeages et de contrôle de la qualité des eaux de surface (MNT 2016)

2.2. Installation des stations limnimétriques

Une station de jaugeage est un site où on réalisera les différentes opérations nécessaires à l'acquisition des débits en fonction de la hauteur d'eau, en tenant compte que la relation hauteur-débit reste stable dans le temps (LABORDE, 2007). Les hauteurs d'eau seront lites directement sur un élément d'échelle graduée installé verticalement au bord du cours d'eau, cette échelle est appelée échelle limnimétrique construite en tôle métallique (Figure10-6). L'établissement d'une échelle est nécessaire de suivre l'évolution du débit tout au long de l'année. L'installation et le choix d'une station se font selon les critères suivants (OMM, 1994);

- Le tronçon du cours d'eau doit être droit ;
- La section transversale doit être stable et surtout la sédimentation doit être faible ;

Nous avons installé six échelles limnimétriques à l'exutoire des sous bassins ainsi sur le grand cours d'eau de l'oued de Srou.



Figure 10-6 : Echelle limnimétrique installée sur l'oued de Srou et sur l'affluent Assif N'douma

2.3. Méthode de jaugeage complètes avec le micro-moulinet

Dans la bibliographie, on a trouvé un tas de méthodes et de matériels de jaugeages. Le choix de la méthode adéquate pour notre travail est basé sur deux critères ; le premier est la disponibilité du matériel, vu qu'on est des étudiants de la faculté des lettres et des sciences humaines, donc on dispose de zéro matériel de jaugeage, le deuxième critère c'est que notre travail ne demande pas un matériel sophistiqué pour effectuer ces mesures. On veut effectuer des jaugeages en période des étiages dont le débit ne dépasse pas dans la plupart du temps un mètre cube par seconde. Pour cela on a pris le contact avec un technicien de l'ABHOER qui

dispose du matériel approprié, il s'agit de la méthode de jaugeage complet en micro-moulinet qui sera décrit en détails.

Cette méthode intègre à la fois la profondeur de l'écoulement dans la section transversale qui est mesurée en différentes verticales à l'aide de la perche, les vitesses qui sont mesurées à l'aide d'un micro-moulinet, en même temps que les profondeurs, en un ou plusieurs points sur la verticale et la mesure des largeurs de la section transversale. La mesure des largeurs, des profondeurs et des vitesses permet le calcul du débit partiel de chaque secteur de la section transversale. La somme de ces débits partiels fournit le débit total (OMM, 1994).

- **Mesure de la section transversale**

On note qu'il n'est pas nécessaire de faire le jaugeage à l'emplacement exact de l'échelle limnimétrique, car, en général, le débit reste le même le long du cours d'eau au voisinage de l'échelle. Mais le site choisi pour le jaugeage devrait répondre aux conditions préconisées par l'OMM telles que : la vitesse doit être supérieure à 0,15 m/s, le lit du cours d'eau est régulier et stable et la profondeur est supérieure à 0,03 m. La largeur du cours d'eau et la distance entre les verticales se mesure à partir de deux points sur les berges. Nous avons réparti les verticales de façon à définir aux mieux la variation de la vitesse de lit du cours d'eau ainsi pour augmenter l'exactitude des jaugeages (Figure 10-7).

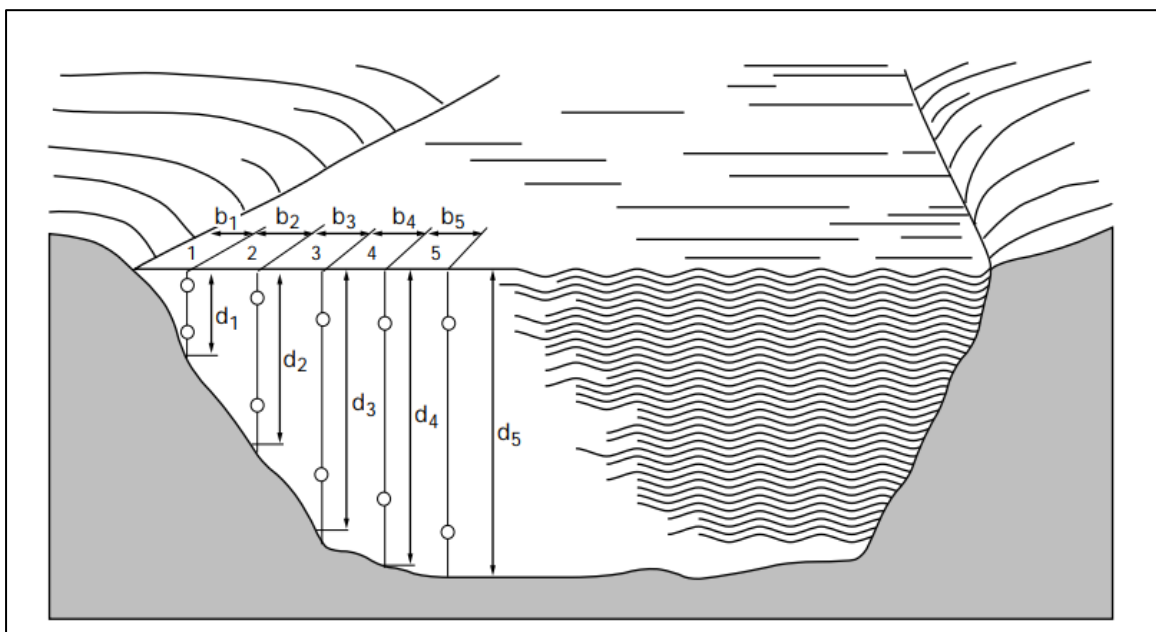


Figure 10-7:Schéma de la section transversale d'un cours d'eau montrant l'emplacement des points de mesure (OMM, 1994).

Les verticales sont variables en fonction aussi de la topographique du lit. De façon générale, l'intervalle entre deux verticales successives ne doit pas dépasser 1/20 de la largeur totale (Guide pratique,). Pour chaque verticale, on mesure la profondeur à l'aide de la perche graduée du micro-moulinet. La profondeur de mesure constitue entre 2/10 et 8/10 de la profondeur de la verticale (OMM, 1994).



Figure 10-9 : Préparation et nettoyage de la section de jaugeage (Assif Tamharrart)



Figure 10-8 : Mesure de la largeur et de la profondeur de la section du cours d'eau

- *Appareils pour la mesure de la vitesse*

La mesure de la vitesse de l'écoulement est réalisée par un micro-moulinet de type OTT de numéro 121244, généralement elle se compose des éléments suivants (Figure 10-10). Le principe du fonctionnement de cet appareil est basé sur la proportionnalité entre la vitesse de l'eau et la vitesse angulaire de l'hélice. La vitesse en un point sur la verticale de mesure est

obtenue en comptant sur 30 secondes le nombre de tours de l’hélice du moulinet monté sur une perche de jaugeage. Ainsi le nombre des tours de l’hélice sont enregistrées par un capteur numérique, ce dernier compte les tours en fonction de l’intervalle du temps qu’on a défini avance. La vitesse de l’eau en ce point est alors calculée en utilisant l’équation d’étalonnage de l’hélice.

| | |
|---------------------|--|
| $v = k \cdot n + C$ | <p>Avec</p> <ul style="list-style-type: none"> - k pas hydraulique de l’hélice du moulinet [m] qui est déterminée par des essais de trainage réalisés en canal d’étalonnage - n nombre de tours de l’hélice par seconde [1/s], - C constants d’hélice [m/s] qui est déterminée par des essais de trainage réalisés en canal d’étalonnage |
|---------------------|--|

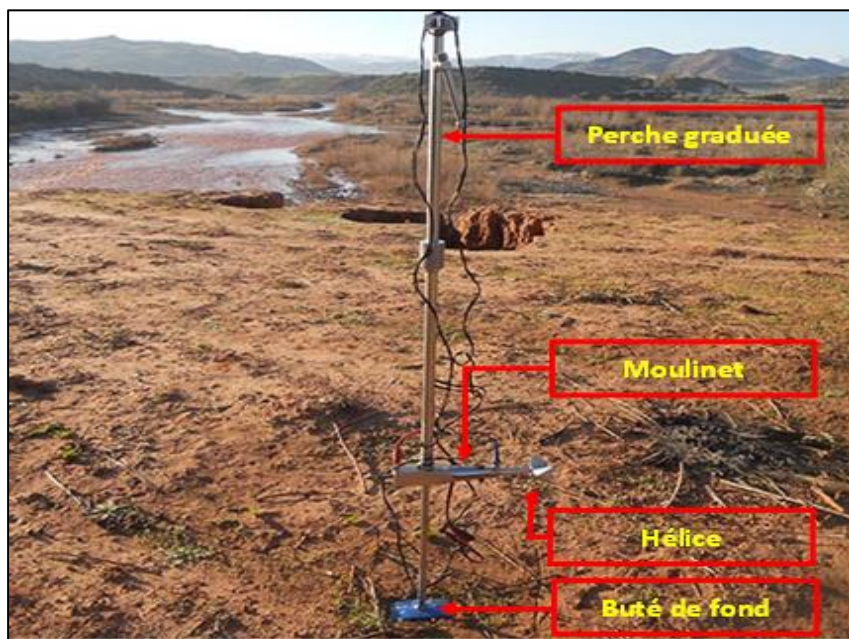


Figure 10-10 : Micro-moulinet de type OTT avec les principaux éléments constitutifs

- **Enregistrement des résultats et dépouillement des jaugeages**

Les tours, la largeur de la section, la profondeur, et les vitesses qui correspondent à chaque verticale obtenue pour chaque point de mesures, sont enregistrées sur des feuilles spéciales dites feuilles de jaugeages, sur laquelle on enregistre aussi la date et l’heure du jaugeage, le nom du jaugeur et les informations sur le matériel de jaugeage utilisé.

Après avoir finir les mesures sur terrain vient le travail du bureau, qui consiste à transformer les nombres de tours obtenus en vitesse moyenne et au débit en mètre cube. Cette opération est

appelée le dépouillement. Pour cet objectif nous avons utilisé le logiciel « DEPJAU » développé par le bureau des recherches géologiques et minières (BRGM) de la France. Ce logiciel effectue tous ces calculs et tous les reports graphiques à partir des données brutes du jaugeage. Il permet le tracé et la visualisation de courbes en tous points semblables à celle du dépouillement manuel. Les courbes sont calculées à partir des points de mesure à l'aide de polynômes d'interpolation.

2.4. Planning des campagnes de jaugeages

Les campagnes de jaugeages ont été programmées en période des basses eaux entre l'année 2016 et l'année 2019, cette période couvre le manque dans la série statistique que l'on dispose et qui s'arrête en 2016. Sur les quatre ans d'observation, on a effectué des campagnes de jaugeages en mois qui enregistre les faibles débits de l'année. Les mois sont choisis selon l'étude statistiques des étiages déjà effectués auparavant, et qui montrent que les débits d'étiage sont produits en mois de juillet et d'août de l'année. Les mesures sont donc faites dans des situations hydrologiques stabilisées sur l'ensemble du bassin versant de l'oued de Srou. Chaque fois qu'on veut réaliser une campagne, on s'assure que les écoulements ne sont pas perturbés par les précipitations, on attend au moins cinq jours après l'arrêt des pluies. On a aussi consacré l'année hydrologique 2017-2018 pour suivre l'évolution des écoulements dans le bassin durant toute l'année, avec une fréquence d'une campagne tous les mois, dans le but d'améliorer la connaissance du fonctionnement hydrologique des sous bassins dans la période des hautes eaux ainsi la création des courbes de tarages.

Tableau 10-3: Organigramme des campagnes de jaugeages

| Année | Mois | Objectif de la campagne |
|-------|---|--|
| 2016 | Février | Diagnostic et choix des sous bassins avec écoulement permanent ainsi les sites de mesure |
| | Mai | Validation des choix et installation des échelles limnimétriques et campagnes de jaugeages |
| | Juin juillet août | Campagnes de jaugeages |
| 2017 | À partir du mois de juin 2017 jusqu'au mois de septembre 2018 | Campagnes de jaugeages chaque mois dans le but d'élaborer des courbes de tarages |
| 2018 | | |
| 2019 | Juin juillet août | Campagnes de jaugeages |

3. Résultats et interprétations

Les résultats des différentes campagnes sont rassemblés et traités avec différentes méthodes dans le but de déterminer le régime des cours d'eau du bassin versant de l'oued de Srou en période d'étiage entre 2016 et 2019.

3.1. Création des courbes de tarages

Dans le but d'élaborer des courbes de tarage et le régime d'écoulement pour l'ensemble des stations choisies dans la présente étude, nous allons étaler la période d'observation du mois de septembre 2017 jusqu'au mois de septembre 2018. Nous allons nous limiter en mois de juillet 2018 pour clôturer l'année hydrologique, les campagnes des mois d'août et septembre 2018 vont être utilisées dans l'analyse des situations des étiages qu'on va effectuer dans les paragraphes suivants.

Le jaugeage instantané apporte le maximum de son information le jour de sa réalisation et son intérêt décroît ensuite en fonction du temps. Pour faire le suivi de l'évolution des cours d'eau, on fait appel aux courbes de tarage. Une courbe de tarage permet, par simple lecture d'un niveau d'eau sur une échelle limnimétrique, d'estimer le débit d'un cours d'eau à un instant donné. La courbe de tarage est propre à chaque échelle limnimétrique.

Pour élaborer une courbe de tarage pour une station donnée, nous avons réalisé une série de campagnes de mesures entre le mois d'août 2017 et le mois de septembre 2018 de façon à intervenir pour des régimes hydrologiques variables, autrement dit à des hauteurs d'eau différentes (périodes des hautes eaux et basses eaux) (Figure 10-12).



Figure 10-11 : Mesure du débit et de la hauteur d'eau dans les hautes eaux (janvier 2018) et les basses eaux (août 2017) (station d'Assif N'douma)

Lors de chacune des campagnes, on note le niveau de l'échelle puis on réalise, dans le lit du cours d'eau, les mesures nécessaires au calcul du débit instantané. Selon les stations, le nombre de campagnes de mesures nécessaires au tarage de l'échelle est variable.

On reporte ensuite les résultats obtenus sur un graphique comportant deux axes (X = hauteur d'eau (cm) et Y = débit (m^3/s)). Chacune des campagnes de mesures permet de positionner un point sur le graphique. Enfin, on trace une courbe de tendance correspondant à la courbe lissée la plus représentative possible de l'allure générale dessinée par l'ensemble des points (Figure 10-11) (GHADBANE ET AL., 2020).

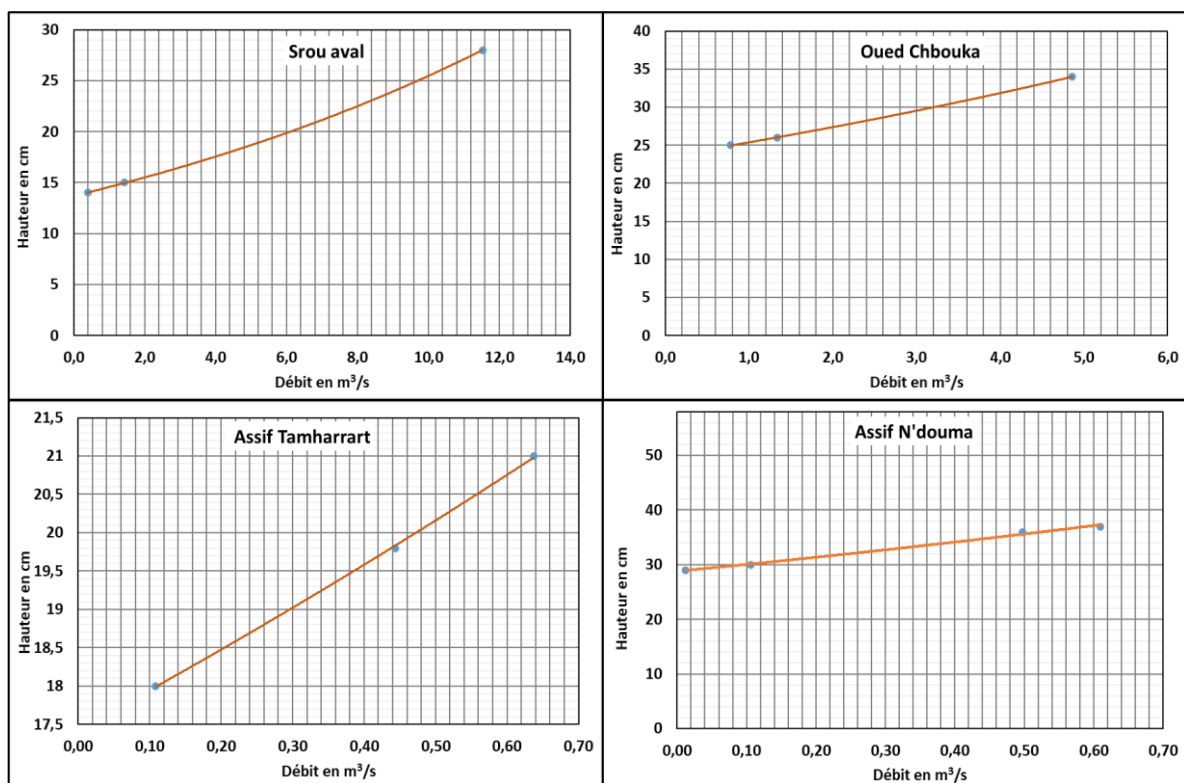


Figure 10-12 : Courbe de tarage des stations de l'oued de Srou et ses affluents l'oued de Chbouka et Assif Tamharrart (2017-2018)

3.2. Régimes d'écoulements du bassin versant de l'oued de Srou et de ses affluents (2017-2018)

Nous allons essayer de caractériser la variation de l'écoulement à l'échelle mensuelle durant l'année hydrologique 2017-2018. Les graphes de la figure (10-13) montrent les résultats obtenus pour le bassin versant de l'oued de Srou en aval et dans ces principaux affluents.

Une grande variabilité dans le Srou, les débits varient entre 0,317 m^3/s comme valeur la plus faible en mois de novembre et 11,85 m^3/s comme valeur maximale au mois de mars. Une légère

variation observée entre l'amont et l'aval de l'oued Srou, ce qui peut être expliqué par deux choses :

- Absence des prélèvements ce qui est dû à la qualité saumâtre des eaux
- Nature imperméable de la vallée de l'oued Srou.

L'écoulement dans les sous-bassins de Tamharrart et Assif Ndouma est moins important, il est de l'ordre de quelques dizaines de litres par seconde. Les régimes d'écoulement des différentes stations choisies sont des régimes simples avec deux phases : une phase des hautes eaux et une autre des basses eaux. Les valeurs maximales des débits sont observées dans le Srou, le Chbouka et Assif N'douma pendant le mois de mars. Alors qu'au niveau d'Assif Tamharrart elle est enregistrée en mois de février. Les valeurs minimales varient d'une station à l'autre, dans le Srou aval et Assif Tamharrart sont enregistrées en mois de décembre, alors qu'au niveau de Chbouka et Assif N'douma les débits minimums sont observés en mois de septembre.

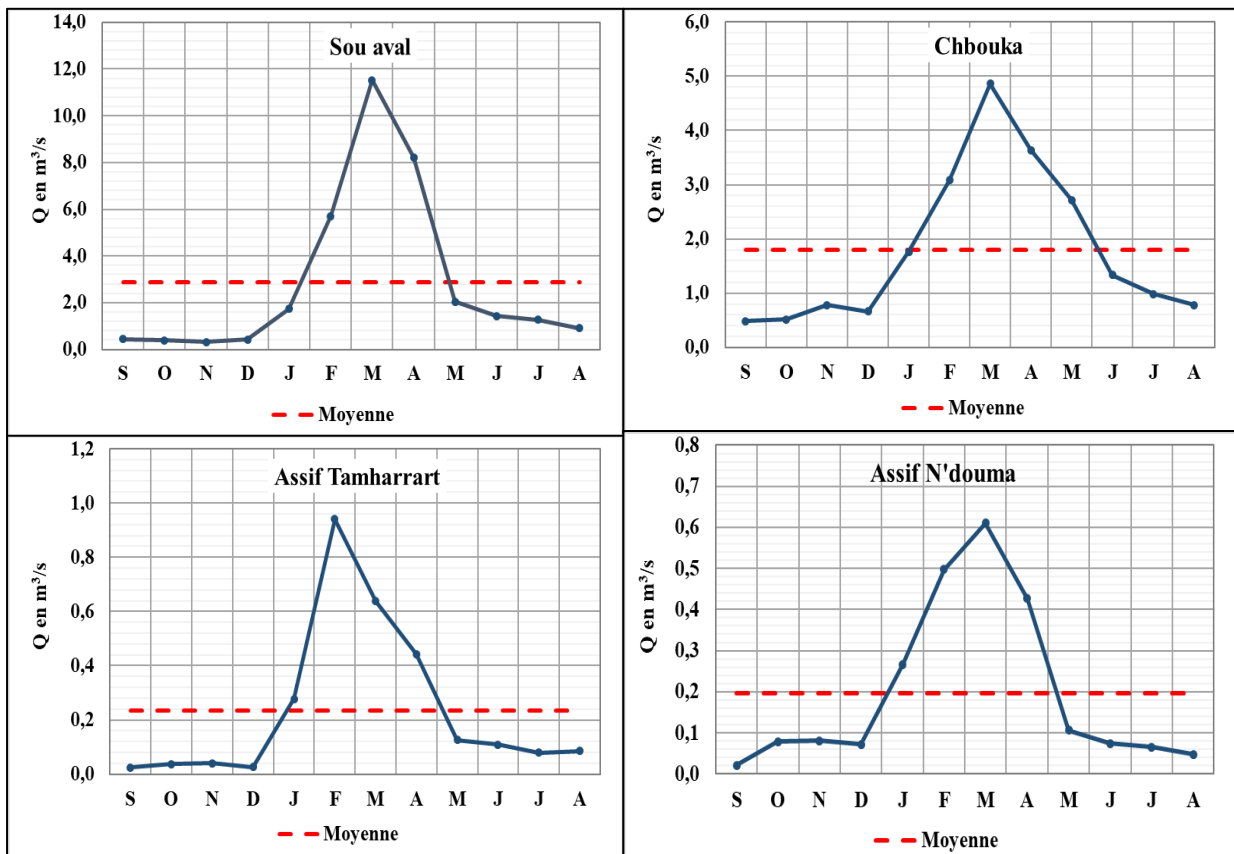


Figure 10-13 : Variation mensuelle des débits dans le bassin versant de l'oued de Srou et de ses affluents durant l'année hydrologique 2017-2018

L'analyse des régimes de l'oued de Srou et de ces affluents durant l'année hydrologique 2017-2018 montrent que la grande partie des débits s'est écoulée entre les mois de février et avril. En ce qui concerne les étiages, nous pouvons observer qu'il y a un étalement de ces

phases. En effets, dans le Srou et au niveau d'Assif Tamharrat des étiages phénoménaux ont été produite en mois de décembre.

3.3. Profils hydrologiques de l'oued de Srou (2016-2019)

Les débits des campagnes de jaugeages en basses eaux permettent l'élaboration des profils hydrologiques des différents cours d'eau.

Le profile hydrologique représente la progression d'amont en aval, des débits des rivières principales (FRANÇOIS D., ET AL IN LEBAUT, 2000). Il permet de comprendre les modalités l'alimentation d'un cours d'eau en période des basses eaux sur son linéaire ou en fonction de sa surface (OBDA ET AL., 2000 IN QADEM, 2014). Les profils hydrologiques matérialisent l'évolution cumulative des cours d'eau et renvoient ainsi les réalités géographiques du bassin versant où ils mettent en évidence « la complexité des paramètres naturels intégrés du bassin » (SARY, 1993 IN QADEM, 2014).

La création des profils hydrologiques nécessite au moins trois points de jaugeages. Graphiquement les profils sont représentés par des courbes qui montrent l'évolution des débits bruts ou spécifiques du cours d'eau de l'amont vers l'aval, en fonction de la surface du bassin ou des points kilométriques (LEJEUNE ET AL., 1989 IN QADEM).

Le profil hydrologique du bassin de l'oued de Srou a été élaboré à partir des campagnes de mesures en quatre points sur le cours principal, qui ont été réalisées pendant les périodes de basses eaux, au cours de laquelle il a été confirmé qu'il n'y avait pas d'influence des précipitations sur le régime (Figure 10-14).

Avant d'attaquer l'analyse, il faut noter que la pente d'un segment est représentative de l'augmentation ou de la diminution du débit spécifique de la zone homogène de bassin versant relative à ce segment :

- Si la pente est égale à 1, le débit spécifique est identique pour toute la zone homogène (débit et surface augmentent de la même façon),
- Si elle est supérieure à 1, le débit spécifique augmente de manière exponentielle (le débit augmente plus rapidement que la surface),
- Si elle est inférieure à 1, le débit spécifique diminue de la même manière (la surface augmente plus rapidement que le débit).

L'analyse de profils conduit aux remarques suivantes :

- Les débits s'alignent pratiquement sur des segments de droite et que ces segments sont parallèles d'une campagne de mesures à l'autre.

- Une variabilité importante entre les différentes campagnes de jaugeages, ce qui traduit la situation hydrologique de chaque campagne de mesure.
- Le débit du cours principal de l'oued de Srou connaît dans la plupart des cas une augmentation de l'amont vers l'aval, ce qui montre que ces eaux ne sont pas beaucoup influencées par les prélèvements, du fait que ces eaux sont chargées en sels.

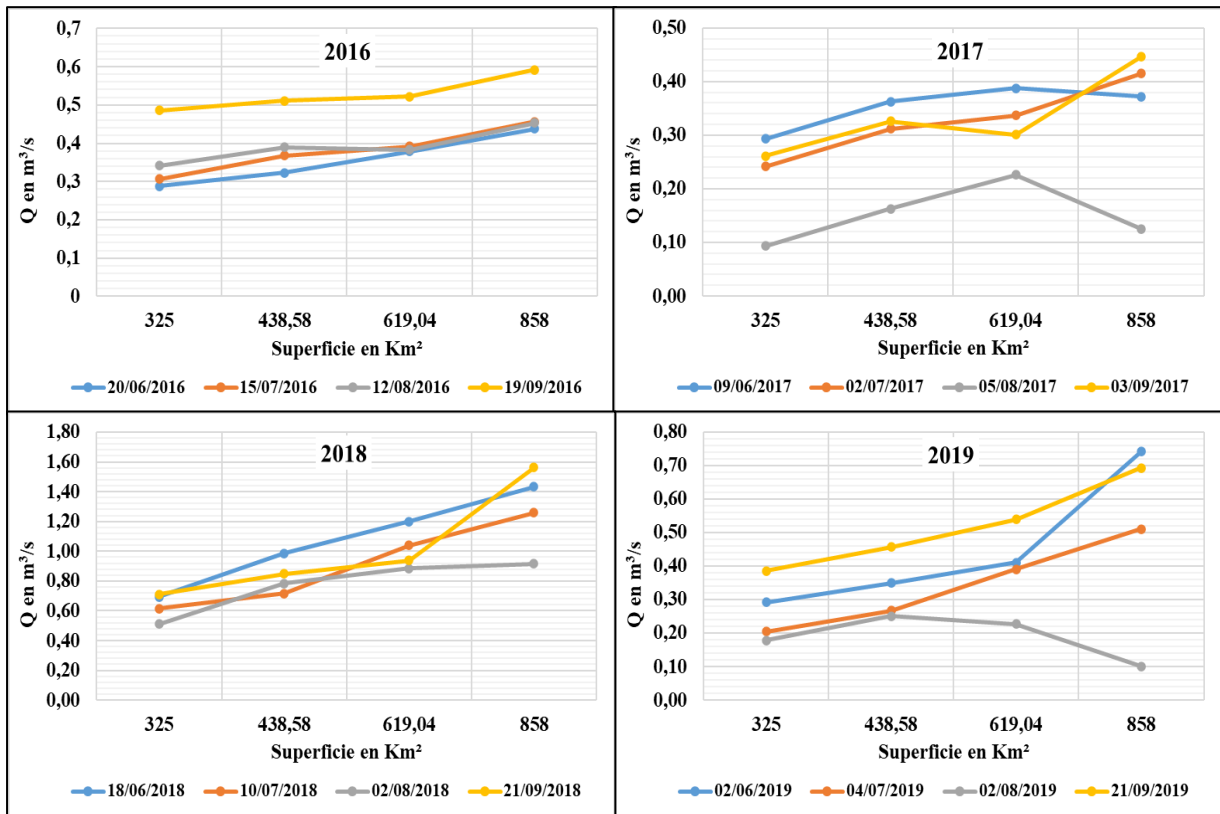


Figure 10-14: Profils hydrologiques du cours d'eau principal de l'oued de Srou

L'avantage que possède le bassin versant de l'oued de Srou entre la station amont et la station aval, c'est qu'il s'écoule dans des formations lithologiques homogènes du Tertiaire (voir carte géologique chapitre 2).

Plusieurs « cassures » existent dans l'ensemble des profils à une surface d'environ 619,04 km², ce qui correspond au point aval du pont de Lkbab. À la surface 438,58 km², où les pentes sont plus faibles, les légères variations de pente sont dues à la présence de petit affluent, Assif Tamharrart qui entraîne localement une augmentation de débit. Les pentes inférieures à 1 observée à la surface 619,04 km² durant les campagnes de 05/08/2017 et 02/08/2019 sont expliquées par la déviation et le blocage des masses d'eau par les carrières qui se trouve en amont, ce qui entraîne par la suite une diminution du débit qui dure quelques heures seulement.

3.4. Le rendement hydrologique du bassin versant de l'oued de Srou et de ses affluents

Le rendement hydrologique en l/s/km² représente la production en eau du bassin unitaire. L'objectif de telle représentation est d'étendre l'analyse déjà réalisée sur les profils hydrologiques à tous les bassins unitaires de la zone d'étude. Il équivaut pour un sous bassin au débit sortant moins le débit entrant (QADEM, 2015).

Les campagnes de jaugeages reflètent l'organisation des écoulements, lorsque les précipitations n'influencent pas directement ou indirectement les écoulements. Les débits d'étiage, calculés à chaque point, sont exprimés en débits spécifiques et sont représentés sous la forme d'une cartographie des rendements hydrologiques (ZUMSTEIN, 1976).

La carte des rendements moyens par bassin unitaire dans le bassin versant de l'oued de Srou (Figure 10-5) fait apparaître une importante disparité spatiale de la ressource en eau entre 2016 et 2019.

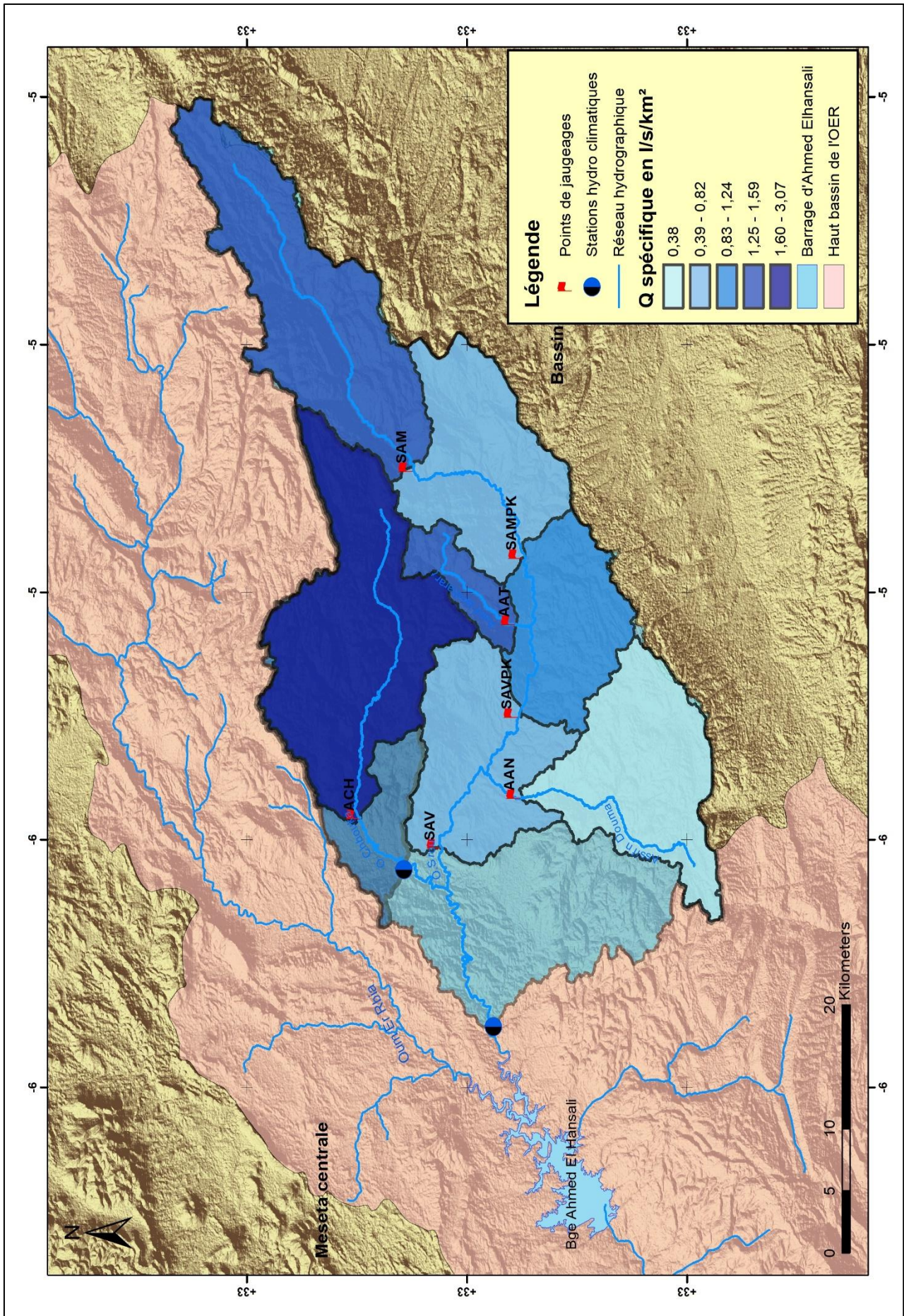


Figure 10-15 : Carte du rendement moyen des bassins unitaires du bassin versant de l'oued de Srou (à partir de 27 valeurs de débit) (MNT 2016)

Les rendements sont plus importants pour les stations d'amont. Il s'agit du bassin versant de l'oued de Chbouka qui présente le rendement le plus important, il est de l'ordre de 3,07 l/s/km², suivi par le bassin d'Assif Tamharrart avec un rendement de 1,59 l/s/km² et le bassin versant amont de l'oued de Srou avec un rendement de 1,47 l/s/km². Ces bassins prennent leurs naissances de la bordure est des causses du Moyen-Atlas. En effet, la région du bassin de Chbouka est riche des formations karstiques comme les sources d'Arougou, les lacs Tigalmamine, Agoulmane Miami et Agoulmane Oumlil. Ces formations rendent compte d'un aquifère de forte potentialité, et qui assure la pérennité régulière de l'oued Chbouka en saisons et années très sèches.

Dans le secteur inscrit dans les formations tertiaires imperméables, situé en aval du point SAM, les rapports sont très faibles, ils ne dépassent pas les 0,82 l/s/km², à l'exception du tronçon entre les points SAMPK et SAVPK qui bénéficie des apports de l'affluent Assif Tamharrart.

Malgré le caractère géologique perméable du bassin ainsi la présence de plusieurs formes karstiques (exp : Agoulmane Boutehra) en amont du bassin, Assif N'douma, présente de faibles ressources en eau ; les rendements sont de l'ordre de 0,365 l/s/km². L'explication de cette diminution dans les rapports est due aux prélèvements anthropiques. En effet, ces eaux sont largement utilisées pour l'irrigation, par prélèvement direct (motopompes et dérivations) en aval du village de Sidi Yahia ou Saad. En revanche, les apports de ce bassin peuvent être considérables en situation de hautes eaux et ils provoquent des crues qui coupent la route de Khénifra-Lkbbab en permanence.

3.5. Coefficients de tarissement du bassin versant de l'oued de Srou et de ses bassins unitaires

Contrairement aux bassins globaux, l'homogénéité lithologique des bassins unitaires permet d'avoir des coefficients tarissements plus ou moins constants, quelle que soit la phase hydrologique (LEBAUT, 2000).

L'analyse du coefficient de tarissement traite la relation $Q = Q(t)$ en régime non influencé par les précipitations (HALL, 1968). Sur la base des équations théoriques régissant la circulation des eaux souterraines, la décroissance des débits des aquifères peut être représentée comme une fonction des caractéristiques de l'aquifère : « le coefficient de tarissement renferme des informations concernant le stockage et les caractéristiques des aquifères » (TALLAKSEN, 1995). BERKALOFF (1967) a testé plusieurs formules de tarissement dans des milieux homogènes, et il a conclu à la bonne validité de la formulation de Maillet (59 % d'eau débitée suivant cette loi).

À partir du débit initial (Q_0), la décroissance du débit est exprimée en fonction du temps (t) comme suit : $Q_0 = Q_t \cdot e^{-at}$.

- **Exposé de la méthode (illustration pour la station ACH)**

La détermination des valeurs du coefficient de tarissement a été basée sur quatre campagnes de mesure en juin et août 2016 et les autres en juin et septembre 2017, chaque campagne étant séparée de 77 et 108 jours. Le débit initial Q_0 correspond à la valeur de débit la plus élevée mesurée lors de la campagne de mesures de juin 2016 considérée t_0 , suivie de la campagne de mesure au cours du mois d'août de la même année (t_1). Il y a 77 jours entre les périodes t_0 et t_1 . Au cours de ces périodes, il a été confirmé qu'il n'y avait pas d'effet des précipitations de pluie sur le débit. Une diminution progressive des valeurs de débit a été observée durant cette période de l'année. Dans un deuxième temps, la valeur du débit pour la première campagne de mesure de juin 2017 est fixée sur la courbe décroissante et nous cherchons l'intervalle entre le nombre des jours qui correspond à cette valeur du débit t_3 , qui est de 22 jours pour la station ACH. Enfin, le temps entre les deux campagnes de mesure de l'année 2017 sera donc 22 jours plus l'intervalle entre ces deux mesures (86 jours) est ajouté pour représenter la valeur de débit de la dernière campagne de mesure sur la courbe.

Tableau 10-4: Phases utilisées pour l'identifications des coefficients de tarissement du bassin versant de l'oued de Srou et ses bassins unitaires

| Bassin | 1 ^{ère} Campagne | 2 ^{ème} campagne | Nbr de jours | α |
|--------|---------------------------|---------------------------|--------------|----------|
| ACH | 03/06/2016 | 19/08/2016 | 77 | 0,007 |
| | 09/06/2017 | 03/09/2017 | 108 | |
| SAV | 06/05/2019 | 02/08/2019 | 88 | 0,026 |
| | 02/07/2017 | 05/08/2017 | 64 | |
| AAT | 09/06/2017 | 05/08/2017 | 57 | 0,017 |
| | 02/06/2019 | 02/08/2019 | 64 | |
| AAN | 18/06/2018 | 02/08/2018 | 45 | 0,009 |
| | 09/06/2017 | 02/07/2017 | 52 | |

Les graphes de la figure (10-16) présentent les résultats de cette méthode appliquée au bassin versant de l'oued de Srou et de ses bassins unitaires.

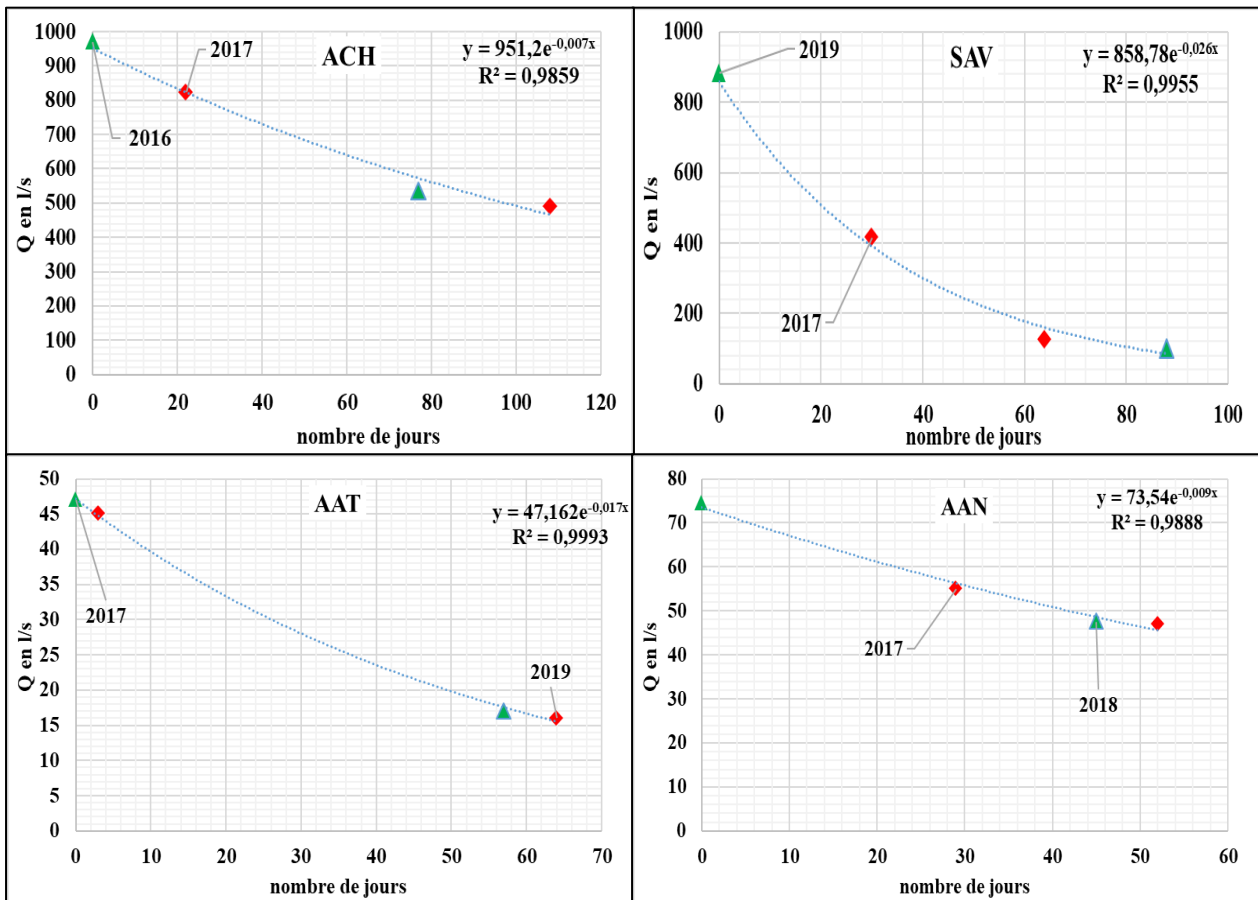


Figure 10-16 : Construction des courbes de tarissement pour le bassin versant de l'oued de Srou et de ses bassins unitaires

L'oued de Srou et celui d'Assif Tamharrart présentent des coefficients de tarissement importants, ils sont respectivement 0,026 et 0,017. Ces valeurs indiquent une vidange rapide des aquifères de ces bassins. L'oued de Chbouka présente le coefficient de tarissement le plus faible, il est de l'ordre de 0,007 suivie par le bassin d'Assif N'douma qui possède un coefficient de l'ordre de 0,009. Ceci montre que la vidange des aquifères de ces bassins est très lente.

Axe 27 : Impact des étiages sur la qualité du milieu naturels dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)

La diminution du débit en périodes d'étiage favorise la dégradation de la qualité du milieu naturels. En effet, la réduction du débit fluvial peut également aggraver les effets de la pollution de l'eau. Heicher (1993) a décrit un certain nombre d'effets environnementaux possibles causés par la réduction du débit réservé. Une telle réduction peut entraîner une sédimentation accrue qui modifie la morphologie du chenal et de la plaine inondable. Les changements dans la morphologie des cours d'eau peuvent potentiellement affecter la distribution et l'abondance des êtres vivants des cours d'eau. Les étiages peuvent avoir pour conséquence de modifier la végétation dans les milieux aquatiques : la baisse des niveaux peut conduire au développement rapide de certaines espèces, alors que d'autres espèces peuvent disparaître de manière plus ou moins prolongée.

À la suite d'une étude précédente réalisé sur le haut Oum-Er-Rbia (Ghadbane, 2015) la qualité en aval de l'oued de Srou se trouve dégradé surtout en période des basses eaux.

1. Evolution de la qualité physique des eaux de surface du bassin versant de l'oued de Srou

Dans cette lumière nous avons effectué des campagnes de mesures de la qualité physique de l'oued de Srou et de ses affluents, au niveau des points suivants (carte de la figure 10-5).

- AAT : affluent Assif Tamharrart
- AAN : affluent Assif N'douma
- ACH : Oued de Chbouka
- SAV : Srou aval

Les campagnes de mesure en étaient effectuées lors des campagnes de jaugeages entre septembre 2017 et août 2018. Les paramètres utilisés sont la température de l'eau, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité électrique. Ces paramètres sont mesurés sur place à l'aide d'un appareil spécial appelé pH-mètre/Conductimètre.

L'objectif est de suivre l'évolution de ces paramètres en périodes des hautes eaux et des basses eaux, dans le but de déterminer l'impact des étiages sur la qualité des eaux de surface dans le bassin versant de l'oued de Srou. Les résultats d'analyses vont être comparés avec les normes de qualité nationales adoptées pour les eaux de surfaces.

1.1. Grille générale de la qualité des eaux de surface

La grille générale nationale de la qualité des eaux de surface fixe cinq classes de qualité selon les usages auxquels sont destinées (Article 1 de l'arrêté conjoint du Ministre de l'Équipement et du Ministre chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement définissant la grille de qualité des eaux de surface) (Tableau 10-5).

- Classe 1 " Qualité excellente "

Eaux considérées comme exemptes de pollution, aptes à satisfaire les usages les plus exigeants.

- Classe 2 " Qualité bonne "

Eaux de qualité pouvant satisfaire tous les usages, notamment la production de l'eau potable, après un traitement normal.

- Classe 3 " Qualité moyenne "

Eaux de qualité suffisante pour l'irrigation, les usages industriels, la vie piscicole et la production d'eau potable après un traitement poussé.

- Classe 4 " Qualité mauvaise "

Eaux aptes à l'irrigation et au refroidissement. La vie piscicole y est aléatoire et la production d'eau potable est éventuelle.

- Classe 5 " Qualité très mauvaise "

Eaux dépassant la valeur maximale fixée dans la classe 4 pour un ou plusieurs paramètres. Elles sont considérées comme inaptes à la plupart des usages. Chaque classe de qualité est définie par un ensemble de valeurs seuils que les différents paramètres physico-chimiques ou biologiques ne doivent pas dépasser.

Tableau 10-5:Grille générale de la qualité des eaux de surface (SEEE, 2007)

| | | CLASSE 1 | CLASSE 2 | CLASSE 3 | CLASSE 4 | CLASSE 5 | |
|--------------------------------|--|----------------------|----------|-------------|-------------|---------------|------------|
| Paramètres | Unités | Excellente | Bonne | Moyenne | Mauvaise | Très mauvaise | |
| Organoleptiques | | | | | | | |
| 1 | Couleur (échelle Pt) | mg Pt/L | <20 | 20-50 | 50-100 | 100-200 | >200 |
| 2 | Odeur (dilué à 25° C) | | <3 | 3-10 | 10-20 | >20 | - |
| Physico-chimiques | | | | | | | |
| 3 | Température | °C | <20 | 20-25 | 25-30 | 30-35 | >35 |
| 4 | pH | | 6,5-8,5 | 6,5-8,5 | 6,5-9,2 | <6,5ou>9,2 | <6,5ou>9,2 |
| 5 | Conductivité à 20° C | µs/cm | <750 | 750-1300 | 1300-2700 | 2700-3000 | >3000 |
| 6 | Chlorures (Cl ⁻) | mg/l | <200 | 200-300 | 300-750 | 750-1000 | >1000 |
| 7 | Sulfates (SO ₄ ⁻) | mg/l | <100 | 100-200 | 200-250 | 250-400 | >400 |
| 8 | MES | mg/l | <50 | 50-200 | 200-1000 | 1000-2000 | >2000 |
| 9 | O ₂ dissous | mg/l | >7 | 7-5 | 5-3 | 3-1 | <1 |
| 10 | DBO ₅ | mg/l | <3 | 3-5 | 5-10 | 10-25 | >25 |
| 11 | DCO | mg/l | <30 | 30-35 | 35-40 | 40-80 | >80 |
| 12 | Oxydabilité KMnO ₄ | mg/l | ≤2 | 2-5 | 5-10 | >10 | - |
| Substances Indésirables | | | | | | | |
| 13 | Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/l | ≤10 | 10-25 | 25-50 | >50 | - |
| 14 | NTK | mgN/l | ≤1 | 1-2 | 2-3 | >3 | - |
| 15 | Ammonium | mgNH ₄ /l | ≤0,1 | 0,1-0,5 | 0,5-2 | 2-8 | >8 |
| 16 | Baryum | mg/l | ≤0,1 | 0,1-0,7 | 0,7-1 | >1 | - |
| 17 | Phosphates (PO ₄ ⁻) | mg/l | ≤0,2 | 0,2-0,5 | 0,5-1 | 1-5 | >5 |
| 18 | P total (Pt.) | mg/l | ≤0,1 | 0,1-0,3 | 0,3-0,5 | 0,5-3 | >3 |
| 19 | Fe total (Fe) | mg/l | ≤0,5 | 0,5-1 | 1-2 | 2-5 | >5 |
| 20 | Cuivre (Cu) | mg/l | ≤0,02 | 0,02-0,05 | 0,05-1 | >1 | - |
| 21 | Zinc (Zn) | mg/l | <0,5 | 0,5-1 | 1-5 | >5 | - |
| 22 | Manganèse (Mn) | mg/l | ≤0,1 | 0,1-0,5 | 0,5-1 | >1 | - |
| 23 | Fluorure (F ⁻) | mg/l | ≤0,7 | 0,7-1 | 1-1,7 | >1,7 | - |
| 24 | Hydrocarbures | mg/l | ≤0,05 | 0,05-0,2 | 0,2-1 | >1 | - |
| 25 | Phénols | mg/l | ≤0,001 | 0,001-0,005 | 0,005-0,01 | >0,01 | - |
| 26 | Détérgents anioniques | mg/l | ≤0,2 | ≤0,2 | 0,2-0,5 | 0,5-5 | >5 |
| Substances Toxiques | | | | | | | |
| 27 | Arsenic (As) | µg/l | ≤10 | ≤10 | 10-50 | >50 | - |
| 28 | Cadmium (Cd) | µg/l | ≤3 | ≤3 | 3-5 | >5 | - |
| 29 | Cyanures (CN ⁻) | µg/l | ≤10 | ≤10 | 10-50 | >50 | - |
| 30 | Chrome total (Cr) | µg/l | ≤50 | ≤50 | ≤50 | >50 | - |
| 31 | Plomb (Pb) | µg/l | ≤10 | ≤10 | 10-50 | >50 | - |
| 32 | Mercure (Hg) | µg/l | ≤1 | ≤1 | <1 | >1 | - |
| 33 | Nickel (Ni) | µg/l | ≤20 | ≤20 | 20-50 | >50 | - |
| 34 | Selenium (Se) | µg/l | ≤10 | ≤10 | ≤10 | >10 | - |
| 35 | Pesticides par subst. | µg/l | ≤0,1 | ≤0,1 | ≤0,1 | >0,1 | - |
| 36 | Pesticides totaux | µg/l | ≤0,5 | ≤0,5 | ≤0,5 | >0,5 | - |
| 37 | H.P.A. totaux | µg/l | ≤0,2 | ≤0,2 | ≤0,2 | >0,2 | - |
| Bactériologiques | | | | | | | |
| 38 | Coliformes fécaux | /100ml | ≤20 | 20-2000 | 2000-20.000 | >20.000 | - |
| 39 | Coliformes totaux | /100ml | ≤50 | 50-5000 | 5000-50.000 | >50.000 | - |
| 40 | Streptocoque. Fécaux | /100ml | ≤20 | 20-1000 | 1000-10.000 | >10.000 | - |
| Biologique | | | | | | | |
| 41 | Chlorophylle a | µg/l | <2,5 | 2,5-10 | 10-30 | 30-110 | >110 |

1.2. Variation de la température dans le bassin versant de l’oued de Srou et ses affluents (2017-2018)

La température fait partie, avec l’écoulement et l’oxygène, des principaux paramètres abiotiques qui interagissent pour créer les conditions de l’exercice de l’ensemble des fonctions biologiques. Par exemple, la quantité d’oxygène dissous dans l’eau diminue lorsque sa température augmente. La biodiversité est directement impactée par cette augmentation : diminution de l’activité des poissons à la suite de l’élévation de la température, développement plus important d’algues microscopiques, épisode d’asphyxie, etc. Le réchauffement de l’eau accentue le risque d’eutrophisation.

Plusieurs facteurs peuvent modifier la température des cours d’eau. Elle évolue en fonction de l’énergie gagnée ou perdue le long de son parcours. Ainsi la variabilité temporelle et spatiale des flux énergétiques et des processus hydrologiques crée des hétérogénéités dans la température des cours d’eau à différentes échelles. CAISSIE ET AL, 2006, classifient les facteurs de contrôle de la température en quatre catégories : les conditions atmosphériques, l’hydrologie, les échanges à l’interface eau/sédiments et la géomorphologie.

La température des cours d’eau du bassin versant de l’oued de Srou et de ces affluents connaît une variation assez importante à l’échelle temporelle et spatiale (Figure 10-17).

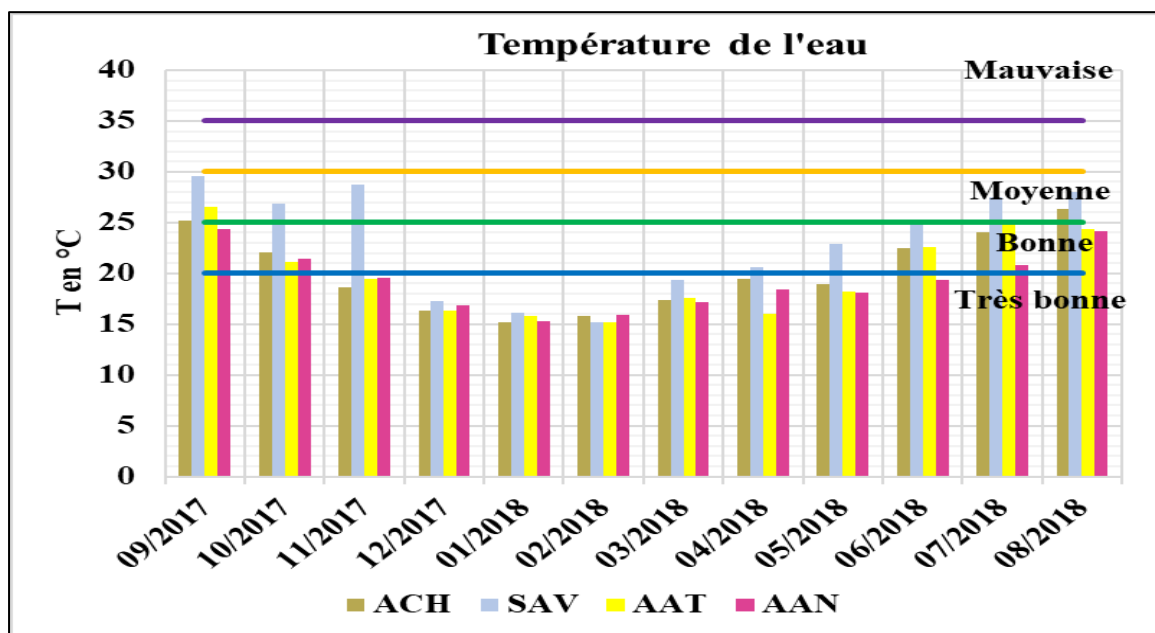


Figure 10-17: Evolution de la température de l’eau dans le Bv de Srou et ses affluents (2017-2018)

Les valeurs les plus importantes sont observées dans les stations de SAV (Srou aval) et AAT (Assif Tamharrat). La température maximale est de l’ordre 29,6 °C enregistrés dans la station Srou aval. Les sous bassins de Chbouka (ACH) et celui de l’Assif N’douma (AAN) connaissent

des valeurs assez faibles. Cette différence peut être liée à l'origine de ces eaux. En effet les sous bassins de l'oued Chbouka et d'Assif N'douma, prennent leurs sources à partir des formations karstiques qui sont alimentées des fentes de neiges.

À l'échelle temporelle, les températures diminuent en périodes de hautes eaux et augmentent en périodes des basses eaux. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées en mois de janvier et de février, alors que les valeurs maximales sont observées en mois de juillet, août et septembre.

En générale, les eaux du bassin versant de l'oued de Srou et de ces affluents sont de bonne à moyenne qualité pour ce paramètre.

1.3. Variation du pH dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)

La détermination du pH constitue une mesure de la concentration des ions H^+ dans l'eau. Cette mesure est très importante, car la valeur du pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques. Dans les eaux naturelles, c'est-à-dire non soumises aux rejets importants résultant de l'activité humaine, le pH dépend de l'origine de ces eaux, de la nature géologique du lit et du bassin versant de la rivière.

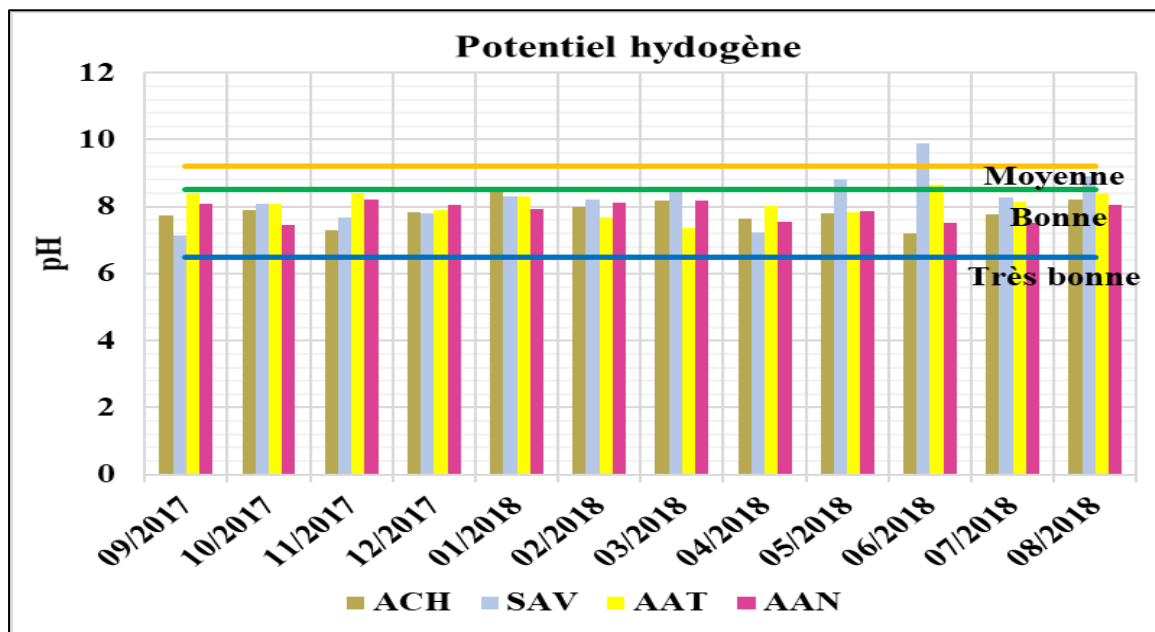


Figure 10-18 : Variation du pH dans le bassin versant de l'oued de Srou et dans ses affluents (2017-2018)

Le pH dans le bassin versant de l'oued de Srou et ces affluents varie en moyen entre 7.8 et 8.5. Une valeur maximale est observée dans le Srou en juin 2018, elle est de l'ordre de 9,9. Ces valeurs montrent que les eaux du bassin et ces affluents sont légèrement basique due à la dissolution des bancs de calcaire.

Les valeurs observées sont presque constantes et ne connaissent pas de grande variation à l'échelle mensuelle. En général, les valeurs enregistrées sont inférieures à la norme de la qualité des eaux superficielles fixées à 8,5.

1.4. Evolution de la conductivité électrique dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)

La conductivité électrique est la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. La conductivité nous informe sur la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissout sera importante, plus la conductivité sera élevée.

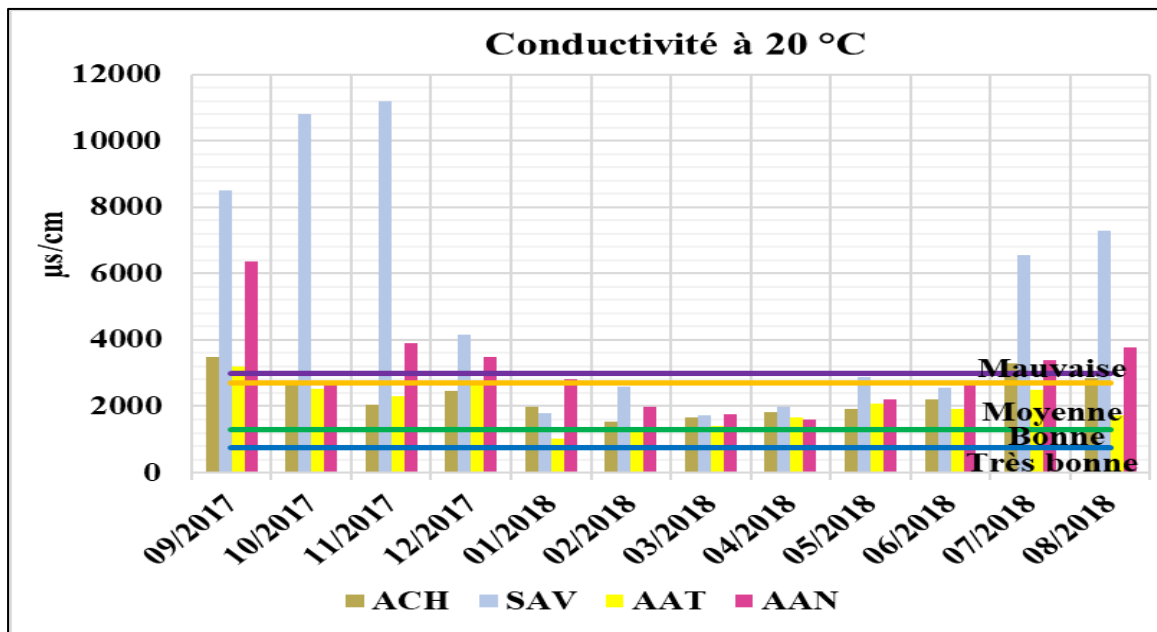


Figure 10-19: Variation de la conductivité électrique dans le bassin versant de l'oued de Srou et dans ses affluents (2017-2018)

Le suivi de la répartition de la conductivité électrique des eaux de surface du bassin versant de l'oued de Srou et ces affluents (Figure 10-19), montre des valeurs très importantes. Elles fluctuent entre 11200 µs/cm comme une valeur maximale enregistrée dans le SAV en novembre 2017 et 1300 µs/cm dans l'AAT en mars 2018. Ces dernières illustrent la forte charge de ces eaux en sels. Cette forte charge est due à l'influence des aires d'affleurement des argiles salifères triasiques qui couvrent une grande superficie du bassin. En période d'étiage, la charge augmente d'avantage et dépasse largement les seuils préconisés par la grille d'évaluation. Ce qui limite ainsi l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation et l'alimentation en eau potable.

1.5. Variation de l'oxygène dissous dans le bassin versant de l'oued de Srou (2017-2018)

L'oxygène dissous représente la concentration d'oxygène gazeux qui se trouve à l'état dissous dans une eau. L'oxygène dissous disponible décroît avec la température et la présence de polluants dans les cours d'eau. Une faible teneur en oxygène dissous est synonyme d'une forte charge polluante ou d'une température élevée de l'eau. C'est un paramètre important de l'écologie des milieux aquatiques, il est essentiel pour la respiration des organismes hétérotrophes (se nourrissent de constituants organiques préexistants), Il est exprimé en mg/l (Rodier, 1996).

Dans notre étude, l'évolution saisonnière de l'oxygène dissous montre des concentrations plus élevées en période humide que celles en période d'étiage. Par exemple, les teneurs enregistrées (Figure 10-20) varient entre 12,67 mg/l (SAV) et 6,05 mg/l (SAV) et entre 12,7 mg/l (ACH) et 6,59 mg/l (ACH) respectivement en période humide et en période des étiages. Ceci est essentiellement dû à la diminution de la température de l'eau ; car une eau froide contient une plus grande quantité d'oxygène dissous qu'une eau chaude (HEBERT ET LEGARE, 2000), et aux fortes vitesses des vents qui engendrent un brassage continu de la masse d'eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène dissous pendant la saison des hautes eaux.

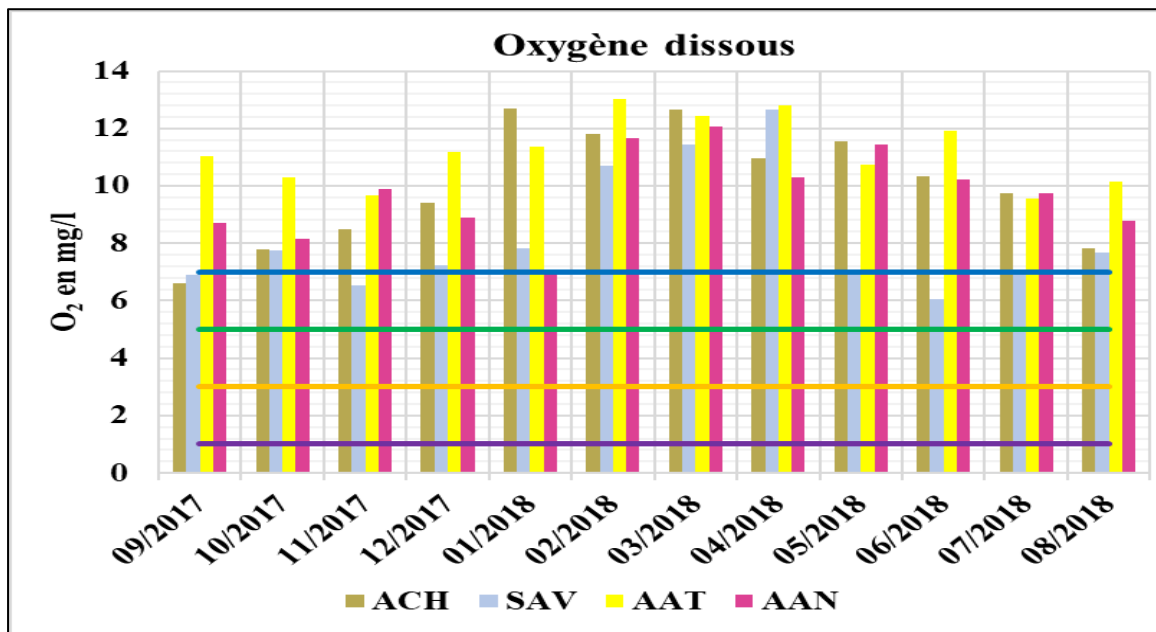


Figure 10-20 : Variation de l'oxygène dissous dans le bassin versant de l'oued de Srou et dans ces affluents (2017-2018)

Le débit important enregistré durant la période de pluie peut aussi augmenter l'échange de l'oxygène avec l'atmosphère faciliter ainsi et la circulation de l'air et par la suite influencer la concentration en oxygène dissous. En effet, les valeurs élevées sont enregistrées qui ont connu

des débits importants pendant les campagnes de janvier, février, mars et avril 2018. Cependant, pendant la période des basses eaux et en particulier en périodes d'étiage, le réchauffement de l'eau et le faible débit de l'oued provoquent une diminution de la dissolution de l'oxygène dissous, aggravé par une augmentation de la consommation de l'oxygène par les organismes vivants dans l'oued et une chute de la vitesse des vents.

Les faibles valeurs d'oxygène dissous observées en périodes d'étiage aux stations (SAV) et (ACH) sont dus à la charge organique des rejets liquides des centres de Lkbab et d'Elhri sans aucun traitement préalable.

Globalement, les eaux du bassin versant de l'oued de Srou et de ces affluents sont de bonnes à excellentes qualités vis-à-vis la concentration en oxygène dissous ; le phénomène d'autoépuration a lieu ce qui permet d'enrichir le taux d'oxygène dissous.

2. Identification des sources de pollution dans le bassin versant de l'oued de Srou

Les ressources en eau sont vulnérables à la pollution engendrée par l'homme. Cette situation s'aggrave en période des étiages. Pour mieux approcher la relation entre les activités humaines et la qualité des eaux nous avons essayé d'identifier les différentes sources de pollution qui existent et qui sont capable d'impacté la qualité des eaux dans le bassin versant de l'oued de Srou. La pollution d'origine industrielle et agricole est quasiment nulle. En revanche, la situation est préoccupante pour la pollution urbaine.

Nous avons effectué une enquête auprès des services communales du bassin dans le but de déterminer l'état des réseaux d'assainissement ainsi leurs milieux récepteurs. Les centres et les villes de notre zone d'étude se localisent à proximités des cours d'eau en général (à une distance inférieure à 5 km) et rejettent leurs eaux usées, dans le milieu naturel sans aucun traitement préalable.

Le réseau d'assainissement dans certains quartiers de certains centres est très ancien et sans aucun renouvellement (Lkbab 1956, Kerrouchan 1970...). La plupart des nouvelles constructions sont réalisées sans raccordement au réseau d'assainissement liquide, parce que les préoccupations de la population pauvre sont focalisées sur le raccordement au réseau d'eau potable et non pas pour l'assainissement. Dans la zone le taux de raccordement aux réseaux

d'assainissement publique est très faible (36 %) par rapport au taux élevé des fosses sauvages et au rejet direct dans les cours d'eau avoisinantes (10-21).

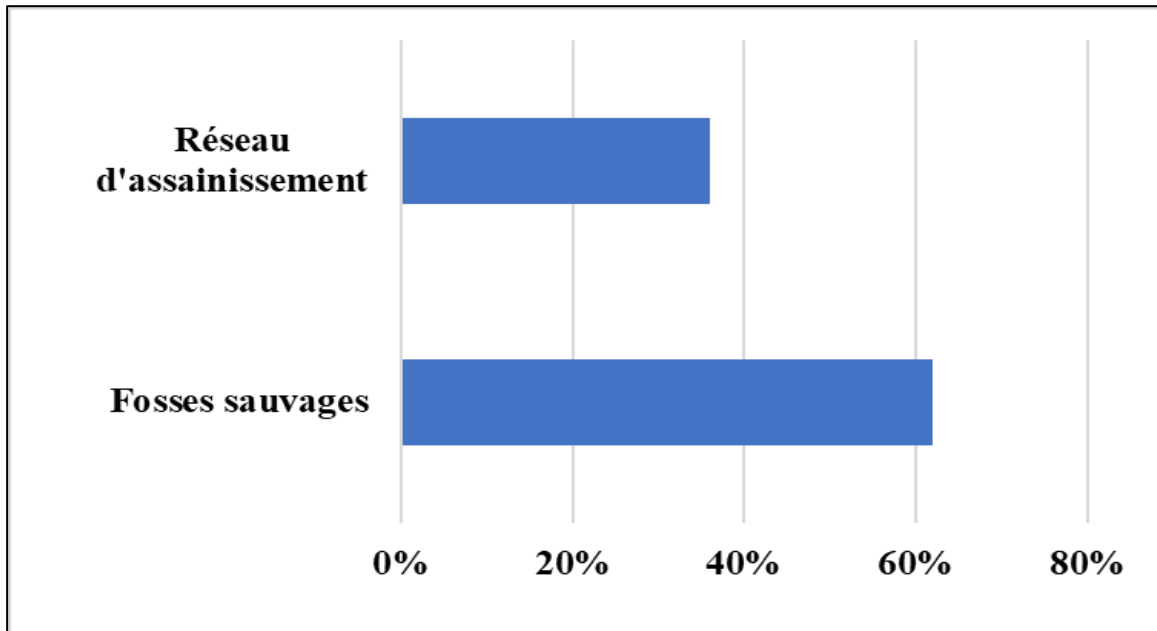


Figure 10-21 : Système d'assainissement liquide dans le bassin versant de l'oued de Srou

En outre, dans la mesure où les rejets dans les milieux interviennent toute l'année, indépendamment d'épisodes de sécheresse, la baisse des débits conduit souvent à une moindre dilution et une évacuation plus limitée des substances rejetées, augmentant ainsi leur concentration dans certaines portions de cours d'eau et entraînant une altération de la qualité de l'eau par prolifération des algues, de la végétation aquatiques ainsi l'apparition des micro-organismes et des insectes. Les proliférations d'algues sont susceptibles de conduire à des rejets de gaz toxiques.



Figure 10-23: Rejet direct des eaux usées du centre Elhri dans l'oued de Chbouka



Figure 10-23: Développement de la végétation aquatique en aval des rejets d'Elhri

L'apparition de ces végétaux signifie la lenteur de l'écoulement, la faible profondeur et l'augmentation de la température de l'eau avec instauration d'une stabilité dynamique. A l'inverse d'un point de vue biologique, la présence de cette végétation aquatique mène à une déstabilisation biologique de l'environnement.



Figure 10-24: Prolifération des algues dans les affluents de l'oued de Srou

3. Etiages et l'accumulation des embâcles

Les embâcles désignent tous les objets qui font obstacles et qui empêchent l'eau de s'écouler (GAZELLE, 2003). En période d'étiage et lorsque les débits deviennent très faibles, les cours d'eau quittent leurs lits. Ce qui provoque une accumulation des embâcles sur les berges abandonnées. Nous avons pu identifier de types principaux d'embâcles qui varient selon leur nature et leurs impacts sur le cours d'eau dans le lit des cours d'eau du bassin versant de l'oued de Srou :

- Les embâcles végétaux (Figure 10-25) : sont les plus fréquents et les plus visibles, ils sont constitués des débris végétaux, de branches (taille moyenne), de troncs d'arbres ainsi que parfois d'arbres entiers (grande taille). Ces produits végétaux sont les témoins d'une érosion des berges pendant la période des hautes eaux. Ces embâcles sont présents tout au long de l'oued de Srou et plus particulièrement dans la partie médiane.
- Les matériaux (Figure 10-26) : Il se composent de sédiments et d'alluvions et sont les premiers effets de la diminution des débits dans le cours d'eau, ils provoquent des dépôts au pied des berges, mais aussi au milieu du cours d'eau si leur profondeur est faible, ils représentent des obstacles à la circulation du cours d'eau.

Ces embâcles perturbent l'écoulement de l'eau et ont des impacts importants : ils entraînent la formation de zones d'eau stagnantes qui conduisent à une apparition des inondations. Ces derniers provoquent et des coupures des routes surtout au niveau des ponts (Figure 10-27). Par

ailleurs, ils contribuent à diminuer la vitesse d'écoulement de l'eau, ce qui se traduit par une faible dynamique du cours d'eau. Ils perturbent les lignes de courant et favorisent l'érosion des berges.



Figure 10-26 : Bloc d'embâcles végétaux (pont en aval du Kerrouchen)



Figure 10-26: Sédiments alluviale dans le lit de l'oued de Srou



Figure 10-27: Accumulation des embâcles au niveau du pont sur Assif Tamharrart

Conclusion du chapitre

Le suivi de la variation des débits en régime non directement influencé sur l'ensemble du réseau hydrographique permet une appréciation fine de la ressource en eau du bassin versant de l'oued de Srou. En effet, les débits mesurés lors des campagnes de jaugeages permettent de comprendre les modalités de l'écoulement et de caractériser les bassins unitaires qui assurent un soutien pour l'oued de Srou en périodes des étiages grâce à la réalisation des profils hydrologiques. Nous avons pu spatialiser des rendements d'étiage et caractériser ainsi les comportements hydrologiques des sous bassins. Les résultats obtenus montrent que les bassins qui s'écoulent dans le substratum calcaire perméable du Moyen-Atlas, présentent donc de bonnes potentialités de ressource en eau souterraine.

Le suivi de l'évolution de la qualité des eaux de surface de l'oued de Srou et de ces principaux affluents montre que ces eaux sont trop chargées en sels, ce qui limite leurs utilisations. Les paramètres de qualité sont en étroite relation avec la variation du débit, surtout l'O₂ dissous et la température. La qualité se dégrade en période des étiages.

Cette démarche de prospection, bien que nécessaire, ne suffit pas à la connaissance fine du fonctionnement de l'hydrosystème Srou et surtout l'impact des faibles débits sur la société. C'est la raison pour laquelle nous avons réalisé le questionnaire. Les résultats permis de quantifier, la pression croissante sur les ressources en eau dans ce territoire montagnard. Cette pression s'exerce sur les eaux douces de surface ou souterrain via un réseau de seguias en terre et des systèmes de pompages à partir des nappes. La situation s'aggrave pendant les périodes d'étiage et les années de sécheresses.

Les majeures sources de pollution identifiées dans le bassin versant de l'oued de Srou sont les eaux usées. Ces eaux en périodes des étiages agissent sur la qualité des eaux du bassin, en provoquant la prolifération des plantes aquatiques et des algues et par la suite l'empoisonnement des eaux et la disparition de la vie aquatique.

Conclusion de la troisième partie

Nous avons essayé d'identifier et caractériser des débits d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou, tout en nous appuyant sur différents indicateurs statistiques à différents pas de temps. Les débits d'étiage connaissent une variabilité importante dans la station de Chacha N'mallah. Cependant, les débits d'étiages dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka sont plus importants et plus stables. Cette différence réside dans le type du substratum qui recouvre ces deux milieux. Généralement, les étiages se produisent en périodes des basses eaux, entre le mois de juillet et de septembre. Des étiages phénoménaux ont été observés pendant la période des hautes eaux, en mois de novembre et décembre. L'analyse de la sévérité permet d'identifier les années les plus déficitaires de la chronique, il s'agit des années 1995 et 2008. Toutes les faibles valeurs des différents indices utilisés pour l'identification des débits d'étiage ont été apparus durant ces années. Ces faibles débits apparaissent une fois tous les 108 ans.

Le bassin versant de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah enregistre un nombre important des phases de tarissement par rapport à celui observé dans la station d'Aval Elhri. Nous avons essayé d'identifier le coefficient de tarissement à l'aide de plusieurs méthodes. La construction de la courbe maîtresse de tarissement et l'analyse statistique ont permis de surmonter la variabilité du coefficient de tarissement. L' α maître, α modal, α médian, α moyen et α de fréquences 0,25 et 0,75, prouvent que les rythmes de vidange des nappes qui assurent l'alimentation est plus important dans la station de Chacha N'mallah que celui de la station d'Aval Elhri. En effet, le débit de nappe constitue une part importante des débits écoulés dans le bassin, plus de 90% des volumes écoulés sont en provenance des aquifères.

La faiblesse des législations nationales en matière de gestion des étiages nous a ramené à chercher à l'échelle internationale, et nous avons trouvé plusieurs lois et textes d'applications, qui organisent la gestion de ces situations. Nous avons essayé de définir des seuils propres à notre bassin sur la base de ces définitions. Le choix du débit d'entrée aux étiages dans le bassin de l'oued de Srou est fixé sur le Q_{75} . Le travail que nous avons réalisé en matière de définition de seuils reste un simple essai. La détermination des fréquences de retour ne suffit pas à définir la sévérité d'une situation ou à fixer des seuils d'étiage, car il faut intégrer les activités humaines et les besoins du milieu naturel. Donc, les niveaux d'étiage doivent être définis en fonction des enjeux économiques et environnementaux.

Les débits mesurés lors de campagnes de jaugeages, la spatialisation des rendements hydrologiques et la création des profils hydrologiques, nous a permis de comprendre les

modalités de l'écoulement et de caractériser les bassins unitaires qui assurent un soutien pour l'oued de Srou en périodes des étiages. Les bassins qui s'écoulement dans le substratum calcaire perméable du Moyen-Atlas, présentent donc de bonnes potentialités de ressource en eau souterraine. Les eaux de surface de l'oued de Srou et de ces principaux affluents présentent des valeurs élevées des sels, ce qui limite leurs utilisations. Les paramètres de qualité sont en étroite relation avec la variation du débit, surtout l'O₂ dissous et la température. La qualité se dégrade en période des étiages. D'autre part, la limite d'utilisation des eaux de surface dans la zone augmente la pression sur les sources et les certains affluents doux. Cette pression s'exerce sur les eaux douces de surface ou souterrain via un réseau de seguias en terre et des systèmes de pompages à partir des nappes. La situation s'aggrave pendant les périodes d'étiage et les années de sécheresses. Les eaux usées sont parmi les grands sources de pollution dans le bassin. L'absence des systèmes d'assainissement et de traitements provoque la dégradation de la qualité des eaux de surfaces et souterraines dans le bassin versant de l'oued de Srou. En périodes d'étiage la situation devient critique par la prolifération des plantes aquatiques, des algues et l'accumulation des embâcles.

Conclusion générale

Le réchauffement climatique de la planète et la diminution très importante des précipitations au sud de la méditerranée observées durant les dernières décennies obligent les gestionnaires et les scientifiques de s'orienter vers la problématique des étiages. Au Maroc, pays de la rive sud du bassin méditerranéen se trouve particulièrement touché par le problème de la pénurie en eau. Cette situation s'observe sur l'ensemble des bassins versants du pays et s'aggrave pendant les périodes des étiages. Notre problématique s'inscrit dans ces préoccupations. Elle vise à caractériser l'écoulement dans un bassin versant de l'oued de Srou, affluent de l'oued Oum-Er-Rbia au niveau du barrage d'Ahmed Elhansali durant ces périodes. C'est ainsi leur apport principal concerne les points suivants :

- La quantification des entrées pluviométriques dans le bassin versant de Srou par différentes méthodes géométriques (spatialisations) et statistiques (moyen, écart type, coefficient de variation...)
- La détermination de la quantité perdue d'eau à l'échelle du bassin par évapotranspiration dans le but de déterminer le bilan hydrologique.
- Extraction des débits d'étiages du bassin versant en utilisant différents indices à différentes échelles temporelles (QMNA, VCN et DC).
- L'évaluation de la situation d'étiage en termes de durée
- La comparaison entre les différents indices dans le but de déterminer les seuils réglementaires.
- Détermination des modalités de tarissement du bassin de Srou, ainsi la détermination du coefficient de tarissement et la puissance des aquifères
- La régionalisation des débits caractéristiques d'étiages et la caractérisation du rendement hydrologique dans les différents sous bassins dans le but de déterminer la puissance des aquifères qui assurent l'alimentation du bassin du Srou, par des campagnes de jaugeages.
- Identification de l'impact des étiages sur la société et la qualité des eaux du bassin de Srou,

Dans la première partie, il a été montré que la problématique de la pénurie en eau est structurale au Maroc et il est nécessaire de proposer une gestion rationnelle basée sur des connaissances approfondies de la vraie ressource disponible en période d'étiage. L'identification des débits d'étiages apparaît comme une urgente nécessité. Plusieurs définitions sont proposées pour ce phénomène. Nous avons trouvé que les étiages sont différents des sécheresses hydrologiques et des basses eaux ordinaires. Ce sont des phénomènes qui font partie du cycle hydrologique normale des cours d'eau. Plusieurs indicateurs servent à l'identification

de ces débits. Comme lieu d'application, nous avons choisi un bassin qui appartient au grand château d'eau du Maroc, le bassin de l'oued de Srou, affluent de l'oued Oum-Er-Rbia dans le Moyen-Atlas. Le Bassin est caractérisé par une hétérogénéité structurale bien distinguée. Des valeurs élevées de la densité de drainage avec une dominance d'un substratum du Permo-Trias argileux aux larges vallées du bassin. Ce qui favorise le ruissellement sur l'infiltration. La partie nord-est du bassin constitue la principale zone d'alimentation, elle est dominée par des formations perméables du Lias. Elles favorisent l'infiltration d'une grande partie de la lame d'eau précipitée. Ces eaux rejoignent les réserves souterraines et assurent la pérennité de l'écoulement de l'oued de Srou et de ces principaux affluents.

Dans la deuxième partie, nous avons montré que la région bénéficie d'un climat de type méditerranéen. La zone nord-est est la plus arrosée que les autres parties du bassin. Le traitement de la chronique par la méthode de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 a mis en évidence l'installation des grandes périodes de sécheresse, les plus sévères en 1983 et 2007. La température est plus importante en périodes estivales. Ce qui induit une évapotranspiration intense durant ces phases. Ceci se reflète sur les écoulements dans le bassin. En effet, la variabilité des écoulements reste liée dans sa grande partie à la variabilité et l'abondance des précipitations, ainsi qu'à l'effet de l'évapotranspiration. Grâce au soutien des nappes, l'oued de Srou et l'oued de Chbouka s'échappent de l'assèchement en période des basses eaux. Donc le fonctionnement hydrologique du bassin du Srou est le résultat de deux types d'écoulements : un ruissellement direct lié aux formations imperméables argileuses de la partie médiane et schisteuse de la partie aval. Un écoulement de base bien visible en période des basses eaux, lié aux réserves calcaires de la partie amont (les Causses du Moyen-Atlas).

La troisième partie est consacrée à l'étude des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou, dans laquelle nous avons essayé d'identifier les débits d'étiage en utilisant les différents indicateurs statistiques. La variabilité de ces débits est importante dans la station de Chacha N'mallah. Alors que le sous bassin versant de l'oued de Chbouka est caractérisé par des débits d'étiage plus importants et plus stables. Ces débits sont observés en périodes des basses eaux, entre les mois de juillet et septembre. L'analyse de la sévérité permet d'identifier les années les plus déficitaires de la chronique dans le bassin il s'agit des années 1995 et 2008. Toutes les faibles valeurs des différents indices utilisés pour l'identification des débits d'étiage ont été apparues durant cette année. Les phases de tarissement observées dans la station de Chacha N'mallah sont importantes par rapport à celles observées dans la station d'Aval Elhri. Les coefficients de tarissements sont identifiés à l'aide de plusieurs méthodes (α maître, α modal, α médian, α moyen et α de fréquences 0,25 et 0,75). Ces dernières preuves que les rythmes de

vidange des nappes qui assurent l'alimentation est très importants dans le bassin versant de l'oued de Srou que celui du sous bassin versant de l'oued de Chbouka. Le débit de nappe constitue une part importante des débits écoulés dans le Bassin, plus de 90 % des volumes écoulés sont en provenance des aquifères Moyen-Atlasiques.

Le Maroc enregistre des retards en matière des législations de gestion des étiages. Nous avons essayé de définir des seuils propres à notre bassin sur la base de la législation française des étiages. Nous avons testé plusieurs méthodes pour définir des débits d'entrée aux étiages, le choix du débit d'entrée aux étiages est fixé sur le Q75. Le travail que nous avons réalisé en matière de définition de seuils reste un simple essai. La détermination des seuils d'étiage sur la base de l'analyse statistique ne suffit, car il faut intégrer la dimension sociale et environnementale.

Le suivi de la variation des débits des principaux cours d'eau du bassin entre 2016 et 2019 nous a permis de comprendre les modalités de l'écoulement et d'identifier le rendement hydrologique des bassins unitaires en périodes des étiages. Les bassins qui s'écoulement dans le substratum calcaire perméable du Moyen-Atlas présentent donc de bonnes potentialités de ressource en eau souterraine. Alors que le suivi de l'évolution de la qualité des eaux de surface de l'oued de Srou et de ces principaux affluents entre les hautes eaux et les basses eaux a montré que ces derniers sont très chargés en sels, ce qui limite leurs utilisations. Généralement, les paramètres de qualité sont en étroite relation avec la variation du débit, surtout l'O₂ dissous et la température. La qualité se dégrade en période des étiages. La mauvaise qualité des eaux de l'oued de Srou la limite leur utilisation et augmente la pression sur les sources et les certains affluents doux. Cette pression s'exerce sur les eaux douces de surface ou souterrain via un réseau de seguias en terre et des systèmes de pompages à partir des nappes. La situation s'aggrave pendant les périodes d'étiage et les années de sécheresses. Les principales sources de pollution des eaux détectées dans le bassin sont les eaux usées. L'absence des systèmes d'assainissement et de traitements provoque la dégradation de la qualité des eaux en périodes d'étiage.

En termes de de perspective, nous rappelons d'abord que le contexte climatique globale du bassin versant de l'oued de Srou ainsi le haut bassin de l'oued de l'Oum-Er-Rbia connaisse une régression marquante en termes de rapport pluviométrique. Ce qui agit directement sur les ressources en eau et provoque une diminution des débits des principaux cours d'eau. L'impact est ressenti en aval du barrage d'Ahmed Elhansali, dont la population de la plaine agricole du Tadla et la vie aquatique se trouve menacée depuis 2016. Donc, il est important d'approfondir la connaissance des débits d'étiage dans le contexte hydro-climatique aride et semi-aride, dans

le but de bien gérer le disponible en amont pour y répondre au besoin de la population en même temps de garantir un débit minimal en aval du barrage pour protéger la vie aquatique. Nous souhaitons aussi élargir la présente étude sur d'autres bassins de même contexte à l'échelle nationale. Nous voulons instruire des seuils d'étiages pour les différents cours d'eau qui alimentent les grands barrages du pays. Le but est de rationaliser la gestion de ressources en eaux ainsi de réaliser un équilibre entre le disponible et la demande des activités anthropiques et les besoins du milieu naturel.

En termes de recommandation, nous adressons le message aux gestionnaires des services dans les bassins hydrauliques pour prendre en considération les débits d'étiages obtenus dans cette thèse pour améliorer la gestion de la ressource en eau durant les périodes des basses eaux surtout en amont des barrages du pays.

Bibliographie

- Assani. A. A (1999) : Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 10(4), 245-252.
- Abi-Zeid. I, Bobée. B (1999): La modélisation stochastique des étiages : une revue bibliographique. *Revue des sciences de l'eau/Journal of Water Science*, 12(3), 459-484.
- Abi-Zeid. I. (1997) : La modélisation stochastique des étiages et de leurs durées en vue de l'analyse du risque (Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique).
- Africain. L, Léon. J (1956) : Description de l'Afrique, trad, de l'italien par Alexis Épaulard. Paris, Librairie d'Amérique et d'Orient Adrien-Maisonneuve, 1980.
- Agoumi. A, Debbarh. A (2005) : Ressources en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement. Report prepared within the framework of the " Water: Management of scarcity" organized by the Association of Moroccan Engineers of Bridges and Roads, 13-62.
- Arboleya. M. L, Teixell. A, Charroud. M, Julivert. M (2004) : A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco. *Journal of African Earth Sciences*, 39 (3-5), 319-327.
- Arnaud. M, Emery. X (2000) : Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. <https://agris.fao.org/agris>
- Baillargeon. S (2005) : Le krigeage, revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. <https://corpus.ulaval.ca/jspui/handle/>
- Baudet. E. B. Y, Haida. S, Probst. J. L (2017) : Analyse de la variabilité hydroclimatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride : Le Sebou Au Maroc. *European Scientific Journal*, 13(5), 509-525.
- Baudet. E, Haida. S, Probst. J (2017) : Analyse de la variabilité hydro-climatique et impacts des barrages sur le régime hydrologique d'une rivière de zone semi-aride : Le Sebou Au Maroc. *Européen Scientific Journal*, 13(5), 509-525.
- Bazzana. A, De Meulemeester. J. (2009) : La noria, l'aubergine et le fellah : archéologie des espaces irrigués dans l'Occident musulman médiéval (9e-15e siècles) (Vol. 6). Academia press.
- Beaudet. G, Ruellan. A (1969) : Le quaternaire marocain : état des études : fiches d'auteurs et annotations bibliographiques regroupées.
- Bekkari. L (2009) : Dynamiques institutionnelles des systèmes d'irrigation communautaires au Moyen-Atlas (Maroc) : De la communauté à l'association des irrigants. Presses univ. de Louvain.

- Beltrando. G, Camberlin. P (1995) : Les sécheresses en Ethiopie et dans l'Est de l'Afrique. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 6(1), 87-94.
- Belzile. L, Bérubé. P, Hoang. V. D, Leclerc. M (1997): Méthode éco-hydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/610/1/R000494.pdf>
- Benchekroun. S, Piqué. A, Lucas. J, Besnus. Y, Robillard. D (1987) : Les argiles triasiques du Maroc et leur évolution diagénétique et métamorphique. *Triassic clays of Morocco and their diagenetic and metamorphic evolution. Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 40 (3), 285-293.
- Benkaddour. A (1993) : Changements hydrologiques et climatiques dans le moyen-atlas marocain, chronologie, mineralogie, géochimie isotopique et élémentaire des sédiments lacustres de tigmamine (Doctoral dissertation, Paris 11).
- Bentekhici. N (2006) : Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie). Conférence francophone ESRI, 11 et 12 octobre, Issi- les-Moulineaux,
- Beran. M. A, Gustard. A (1977): A study into the low-flow characteristics of British rivers. *Journal of Hydrology*, 35(1-2), 147-157.
- Berkaloff. E (1967) : Limite de validité des formules courantes de tarissement de débit. *Bulletin de B.R.G.M., section III : Hydrogéologie* 10:31–41.
- Bidwell. V. J (1972) : Agricultural response to hydrologic drought (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
- Bleu. P, Antipolis. S (2006) : Fiches méthodologiques des 34 indicateurs prioritaires pour le suivi de la Stratégie Méditerranéenne pour le Développement Durable. Plan Bleu, Sophia Antipolis, Paris.
- Bodian. A (2011) : Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Carnets de géographes*,(4).
- Bouabdelli. M (1989) : Tectonique et sédimentation dans un bassin orogénique : le sillon viséen d'Azrou-Khénifra (Est du massif hercynien central du Maroc) (Doctoral dissertation, Strasbourg 1).
- Brunet. M (1978) : Recherche d'un test d'ajustement, *Cahiers ORSTOM, Série hydrologie*, 15 (3), p.261-280.
- Bzioui. M (2004) : Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc. *UN Water-Africa*, 94.
- Caissie. D (2006): The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater biology*, 51(8), 1389-1406.

- Castany .G (1982) :Principes et méthodes de l' hydrogéologie. Edition. Dunod, 236p.
- Catalogne. C. (2012) : Amélioration des méthodes de prédétermination des débits de référence d'étiage en sites peu ou pas jaugés (Doctoral dissertation, Doctorat Ocean Atmosphere Hydrologie, Université Joseph Fourier, Grenoble).
- Chapman. T. (1999): A comparison of algorithms for stream flow recession and baseflow separation. *Hydrological Processes*, 13(5), 701-714.
- Chorley. R-J (1969): *Introduction to Geographical Hydrology*. Methuen young books, London, 224 p.
- Chow. VT, Maidment. DR, Mays. LW (1988) : *Applied Hydrology*. McGraw-Hill: New York. 572 p.
- Clausen. B (1992) : Modélisation des récessions de flux dans deux flux danois. *Nordic Hydrol.* 23 (2), 73–88.
- Clausen. B, Pearson. C. P (1995): Regional frequency analysis of annual maximum streamflow drought. *Journal of Hydrology*, 173(1-4), 111-130.
- Clausen. B, Rasmussen. K. R (1993) : Low flow estimation and hydrogeology in a chalk catchment. *Hydrology Research*, 24(5), 297-308.
- Colo. G (1961) : Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen-Atlas septentrional. *Notes, Mem. Serv. Géol. Maroc*, n° 119, Rabat, pp. 721-733.
- Cosandey. C, Bibots. Dacharry. M, Gille. E, Laganier. R, Salvadorp. G (2003) : *Les eaux courantes*, Ed. Belin, 239 p.
- Coutagne. A (1948) : *Météorologie et hydrologie-Etude générale des débits et des facteurs qui les conditionnent*. *La Houille Blanche*, (3), 228-245.
- Dacharry. M (1996) : *Dictionnaire français d'hydrologie*.
- Dahir N°1-16-113 Du 6 Kaada 1437 (2016) : *Portant Promulgation de La Loi N°36-15 Relative à l'eau*.
- Darcy. H (1856) : *Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application...* Victor Dalmont.
- Devos. A, Nejjari. A (1998) : La sécheresse hydrologique récente dans le bassin supérieur du Sebou (Moyen-Atlas). *Rapport de fin de travaux dans le cadre d'une bourse AUPELF- In Mosella*, t.XXV, n° 3-4. pp. UREF, Lab. Géog. Phy, Univ. Metz et Lab., Anal. Géo-envir. Univ. Sidi Mohamed Ben Abdellah, Saïs-Fès, 57p.
- Dingman. S. L, Lawlor. S. C (1995): Estimating low-flow quantiles from drainage-basin characteristics in new hampshire and vermont 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(2), 243-256.
- Doukkali. M (2005) : Water institutional reforms in Morocco. *Water Policy*, 7(1), 71-88.

- Dracup. J. A (1991) : Drought monitoring. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 5(4), 261-266.
- Du Dresnay. R (1988): Recent data on the geology of the Middle-Atlas (Morocco). In *The Atlas System of Morocco* (pp. 293-320). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Dubreuil. P (1974) : Initiation à l'analyse hydrologique, Masson et Cie, éditeurs O.R.S.T.O.M, 217 pages.
- Dubreuil. P, Guiscafré. J (1971) : La planification du réseau hydrométrique minimal. *Cah. ORSTOM Sér. Hydrol*, 8, 3-38.
- El Ghachi. M (2007) : La seille: un système fluvial anthropisé (lorraine, France) . Tome 1. Thèse, Université Paul Verlaine de METZ, France .344p.
- El Ghachi. M (2008) : La caractérisation de l'impact des interventions humaines sur les cours d'eau : cas de la Seille (France) . *Mosella*, tome 30, n° 1- 4.
- El Ghachi. M, Aafir. M, Bouberria . A (2011): Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Taza, dans un contexte de variabilité climatique . Publication des actes du colloque, pp. 1-15.
- El Ghachi. M, Morchid F.Z. (2015) : Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique . *Journal of Materials and Environmental Science*. Volume 6, N 11, 2015. 3346-335. ISSN : 2028-2508.
- El Ghachi. M (2010) : Etiages de 2003 dans un domaine océanique, Méthodologie et Résultats : Le cas de la Seille (Lorraine, France). *Revue Geomaghreb*, n° 6, pp. 45-57.
- El Ghachi. M, Corbonnois J (2004) : Evolution du lit de la Seille sous l'influence des actions anthropiques (Lorraine, Bassin de La Moselle) . Actes du colloque de l'université de Metz. *Revue Mosella* tome XXIX-N°3-4.
- El Jihad. M-D (1982) : L'irrigation dans le Maroc antique. *Homme Terre et Eaux*. Vol 48, pp. 89-9.
- El Jihad. M. D (2005) : Croissance urbaine et problèmes d'assainissement liquide et pluvial dans le bassin du Srou (Maroc central). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 16(1), pp-41.
- El Orfi, T., El Ghachi, M., & Lebaut, S. (2020, July). Comparaison des données de précipitation satellitaires avec les données mesurées dans le bassin versant de l'Oued Oum-Er-Rbia en amont du barrage Ahmed El Hansali (Maroc). In *Changement Climatique Et Territoires* (pp. 271-276).
- Elbouqdaoui. K, Ezzine. H, Badrahoui. M, Rouchdi. M, Zahraoui. M, Ozer. A (2005) : Approche méthodologique par télédétection et SIG de l'évaluation du risque d'érosion hydrique dans le bassin versant de l'Oued Srou (Moyen-Atlas, Maroc). *Geo-Eco-Trop*, 29(1-2), 25-36.
- El-Jabi. N, Ashkar. F, Issa. M (1997) : Application stochastique du phénomène d'étiage. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 24(2), 191-200.

- Faruqi. N. I, Biswas. A. K, Bino. M. J (2001): Water management in Islam. IDRC, Ottawa, ON, CA.
- Fethallah. H (2001) : Cartographie des sols et évaluation de leur utilisation dans un terroir au Moyen-Atlas (Agoudim, Khénifra). Mémoire de 3e cycle en Agronomie, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, 119p.
- Fleig. A. K, Tallaksen. L. M, Hisdal. H, Demuth. S (2005): A global evaluation of streamflow drought characteristics. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2(6), 2427-2464.
- Foody. G. M (2002) : Status of land cover classification accuracy assessment. Remote sensing of environment, 80(1), 185-201.
- Foucault.A, Raoult. J-F (2010) : Dictionnaire de Géologie, Dunod, 7ème édition, Collection, UniverSciences. 416 pages.
- François. D, Gille. E, t Zumstein. J.F (1993) : Analyse des séries chronologiques et application aux données hydro-climatologiques. In : L'Eau, la Terre et les Hommes, livre en hommage à René FRÉCAUT, M. GRISELIN édit., Édit. Presses Universitaires de Nancy, p. 137-146.
- François. D, Sary. M (1994) : Intérêt des profils hydrologiques d'étiage pour la détermination des débits de référence au droit des ouvrages hydrauliques (exemple de la Haute Meurthe dans les Vosges). Revue de géographie alpine, 82(2), 37-44.
- Frécaut. R (1975) : Contribution à l'étude statistique des étiages. Application au domaine tempéré océanique. Revue géographique de l'Est, 15(1), 89-99.
- Gustard. A (1989) : FRENED (Flow Regimes from Experimental and Network Data): The first one hundred days. FRIENDS in Hydrology.
- Gailliez. S (2013) : Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en Région wallonne. Doctoral dissertation, Université de Liège, Liège, Belgique.
- Gamez. P, Zumstein. J.F (1993) : Méthode de détermination des débits de base et de ruissellement d'un cours d'eau . L'eau, la terre et les hommes ; hommage à René Frécaut ; Presses Univ. Nancy, pp. 113-120.
- Garcia. F (2016) : Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Doctoral dissertation, Paris 6.
- Ghabbane, O (2015). Impact des activités anthropiques sur les ressources en eau dans le bassin supérieur de l'oued Oum-Er-Rbia, Mémoire de Master, Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc, 266p.
- Ghabbane, O., El Ghachi, M., Jaa, F., Elkhider, A (2020). Amélioration de la connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'oued Srou : mesures des débits et création d'une courbe de tarage pour l'année 2017 (Bassin de l'oued Oum-Er-Rbia-Maroc). Actes du colloque CES'19 Béni Mellal – Maroc, pp. 59-64.

- Ghadbane, O., El Ghachi, M., Chakir, M. (2021). Étude de la variabilité climatique et de ses impacts sur le régime hydrologique de l'Oued Srou, affluent de rive gauche de l'Oued Oum-Er-Rbia. *Afrique SCIENCE*, 18(2), 69-80.
- George. P, Verger. F (2000) : Dictionnaire de la géographie, Editions PUF, 500 p.
- Gottschalk. L, Tallaksen. L. M, Perzyna. G (1997): Derivation of low flow distribution functions using recession curves. *Journal of Hydrology*, 194(1-4), 239-262.
- Griffiths. G. A, Clausen. B (1997): Streamflow recession in basins with multiple water storages. *Journal of Hydrology*, 190(1-2), 60-74.
- Grovel. R (1996) : La préservation des forêts du Rif centro-occidental: un enjeu de développement de la montagne rifaine/Preservation of forests in the central western Rif massif: A key element in the development of the Rif Mountains. *Revue de géographie alpine*, 84(4), 75-94.
- Gustard. A, Demuth. S (2008): Manual on Low Flow Estimation and Prediction, World Meteorological organization, Operational Report, No.50, 136 p.
- Gustard, A., Bullock, A., et Dixon, J. M. (1992). Low flow estimation in the United Kingdom. *Institute of Hydrology*.
- Hall. A.J (1971) : Baseflow recessions and baseflow hydrograph separation problem. *Proceedings of the Hydrology Symposium, Institution of Engineers, Australia, Canberra*, pp. 159–170.
- Hall. F. R. (1968): Base-flow recessions—A review. *Water resources research*, 4(5), 973-983.
- Hamimed. A, Nehal. L, Khaldi. A, Azzaz. H (2014): Contribution à la spatialisation de l'évapotranspiration d'un agro-système semi-aride en Algérie par utilisation de la télédétection et du modèle METRIC. *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 8), 197-213.
- Hamza. A (1999) : Estimation régionale des débits d'étiage de la province de Québec : développement des modèles régionaux de queues et d'invariance d'échelle. *Doctoral dissertation, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique*.
- Hayes. D. C (1991) : Low-flow characteristics of streams in Virginia (p. 69). *US Government Printing Office*.
- Hébert. S, Légaré. S (2000) : Suivi de la qualité de l'eau des rivières et des petits cours d'eau.
- Heicher. D.W (1993) : Instream flow needs: biological literature review. *Susquehanna River Basin Commission Publication No. 149*, 37 pp.
- Herbig. H. G (1988) : Synsedimentary tectonics in the northern Middle Atlas (Morocco) during the Late Cretaceous and Tertiary. In *The Atlas System of Morocco* (pp. 321-337). Springer, Berlin, Heidelberg.

- Hiez. G (1977) : L'homogénéité des données pluviométriques. Cahiers ORSTOM, série Hydrologie, 14(02), 29-173.
- Hinaje. S, El Fartati. M, Yaagoub. D, Amrani. S, Gharmane. Y, El Fellah Idrissi. B (2019): Paléo-contraintes et Contexte Tectonique de Mise en Place du Volcanisme Alcalin Néogène et Quaternaire du Moyen-Atlas (Maroc). Européen Scientific Journal May, 448-466.
- Hindley. DR (1973) : La définition du débit par temps sec dans la mesure du débit fluvial. J. Inst. Water Engng 27, 438–440.
- Hingray. B, Picouet. C, Musy. A (2009): Hydrologie : Une science pour l'ingénieur (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Hoepffner. C, Soulaïmani. A, Piqué. A (2005) : The moroccan hercynides. Journal of African Earth Sciences, 43(1-3), 144-165.
- Houdret. A (2008) : Les conflits autour de l'eau au Maroc : origines sociopolitiques et écologiques et perspectives pour transformation des conflits. Doctoral dissertation, Universität Duisburg-Essen).
- Hughes. D. A, Smakhtin. V (1996): Daily flow time series patching or extension: a spatial interpolation approach based on flow duration curves. Hydrological Sciences Journal, 41(6), 851-871.
- Jennan. L (1996) : L'évolution des structures socio-spatiales du Moyen-Atlas central: le cas du pays Amekla (Sefrou)/The change in socio-spatial structures in the central Middle Atlas Mountains: the case of the Amekla (Sefrou) region. Revue de géographie alpine, 84(4), 61-74.
- Jouilil. I, Bitar. K, Salama. H, Amraoui. A, Mokssit. A, Tahiri. M (2013) : Sécheresse météorologique au bassin hydraulique OUM-ER-RBIA durant les dernières décennies. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (12).
- Loup. J (1962) : L'Oum er Rebia. Etudes sur une grande rivière des montagnes marocaines. Revue de Géographie Alpine, 50(4), 519-555.
- Karrouk. M.S (2009) : Changement climatique, prédiction et retour des précipitations au Maroc de l'observation et le suivi spatiaux à la modélisation, Revue de géographie du Maroc N°1, Vol. 25. Pages 7- 34.
- Kjeldsen. T. R, Lundorf. A, Rosbjerg. D (2000) : Use of a two-component exponential distribution in partial duration modelling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers. Hydrological Sciences Journal, 45(2), 285-298.
- Laborde. J. P (2000) : Eléments d'hydrologie de surface. Université de Nice-Sophia Antipolis. France (204p).
- Lahlou. N (2021): Les crues dans le haut bassin de l'Oum Er-Rbia (amont station Machraa Edahk) entre 1934-2018 : Identification, mesure, suivi et extraction (Maroc). Thèse de doctorat, Universités Sultan Moulay Slimane, Beni Mellal, 449p.

- Lahlou. N, EL Ghachi. M (2019) : les extrêmes hydrologiques dans les bassins non jaugés : création d'une courbe de tarage et extraction des crues torrentielles (2016-2018) Cas du bassin versant de Kheniss (Bassin d'Oum Er-Rbia-Maroc). International Journal of Environment& Water ISSN 2052- 3408, Vol 8, Issue 3, 2019.
- Lahlou. N, EL Ghachi. M (2017) : variabilité pluviométriques et changement climatique dans le bassin supérieur d'Oum Er-Rbia (1934-2010), (Région Béni Mellal-Khenifra). Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement, ISSN :1737-6688, Numéro 2-Octobre 2017.
- Lambert. R (1975) : Été, étiage et tarissement des cours d'eau dans le bassin garonnais. Revue Géographique de l'Est, 15(1), 139-151.
- Lang. C (2004) : Etiages et tarissement : Approche quantitative et modélisation appliquées à quatre bassins tests, Mémoire de DEA, Université Paul Verlaine, Metz, 104 p.
- 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. (Doctoral dissertation, Université de Metz).
- Lang. C, Gille. E (2006) : Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Norois. Environnement, aménagement, société*, (201), 31-43.
- Lang. C (2011) : Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo: European Journal of Geography*.
- Lang. C, Freyermuth. A, Gille. E, François. D (2006) : Le dispositif PRESAGES (PREvisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères) : des outils pour évaluer et prévoir les étiages. *Géocarrefour*, 81(1), 15-24.
- Lang C., François, D., & Gille, E. (2016). Quel est le débit le plus fréquent d'un cours d'eau? *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, (Volume 10), 1-19.
- Laville. E, Fedan. B (1989) : Le système atlasique marocain au Jurassique : évolution structurale et cadre géodynamique. *Sciences Géologiques, bulletins et mémoires*, 84(1), 3-28.
- Lebaut. S (2000) : L'apport de l'analyse et de la modélisation hydrologiques de bassins versants dans la connaissance du fonctionnement d'un aquifère : les grès d'Ardenne-Luxembourg. Doctoral dissertation, Université Paul Verlaine-Metz.
- Lejeune. O, Devos. A, Marre. A (1989) : Spatialisation des débits d'étiage de la Blaise (Marne- France).
- Lepoutre. B, Martin. J, Chamayou. J (1967) : Le Causse Moyen-Atlasique. *Les cahiers de la recherche agronomique*, N° 24, 1967, congrès de pédologie méditerranéenne, Madrid. Chap IV, pp 207-226.
- Llamas. J (1993) : Hydrologie générale. Principes et application, Gaétan Morin (eds), Québec, 2ème édition, 527 p.

- Losson. B (2003) : Karstification et capture de la Moselle (Lorraine, France vers une identification des interactions. Thèse de Doctorat de l'Université de Metz. 472 p.
- Loup. J(1974): Les eaux terrestres. Hydrologie continentale. Ed. Masson, Paris. 176 p.
- Ly. M, Traoré. B.S, Alhassane. A , Sarr. B (2013) : Evolution of some observed climate extremes in the west African Sahel, *Weather and Climate Extremes*, 1, pp. 19-25.
- Marius. A (1979) : Manuel d'hydrométrie : 4. Mesure des débits à partir des vitesses. Paris : ORSTOM, 318 p. (Initiations-Documentations Techniques ; 41). ISBN 2-7099-0546-9.
- Margat. J (2008) : Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde. Coédition : UNESCO et BRGM, 52, 2p.
- Martin. J (1981) : Le Moyen-Atlas central : Etude géomorphologique. Notes et mémoires du service géologique N° 258Bis, 107 pages.
- Mathier. L, Perreault. L, Bobée. B, Ashkar. F (1992): The use of geometric and gamma-related distributions for frequency analysis of water deficit. *Stochastic Hydrology and Hydraulics*, 6(4), 239-254.
- McMahon. T. A, Mein. R. G (1986) : River and reservoir yield (Vol. 368). Littleton, CO: Water resources publications.
- Meylan. P, Favre, A. C, Musy. A (2008) : Hydrologie fréquentielle : une science prédictive. PPUR presses polytechniques.
- Midgley. D.C, Pitman. W.V, Middleton. B.J (1994): Surface water resources of South Africa 1990, Water Research Commission Report No 298/5.1/94, Pretoria, South Africa.
- Ministère de l'Écologie et du Développement durable et Agences de l'Eau (2003) : Système d'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau (SEQ-Eau), Grilles d'évaluation, version2.
- Ministère de l'Équipement, ministère chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement (2002) : Arrêté n° 1275/02 du 17 octobre 2002 définissant la grille de qualité des eaux de surface. Bulletin officiel, 5 p.
- Mjejra. M (2015) : Étude de l'évapotranspiration dans le bassin versant de Mejerda (en Tunisie): apport de la télédétection satellitaire et des Systèmes d'Information Géographique. (Doctoral dissertation, Université Rennes 2).
- Mngodo. R.J (1997) : Flow duration characteristics of Southern African rivers. *Acta Hydrotechnica* 15/18, Proceedings of oral presentations, FRIEND'97, pp. 49–63.
- Mouhdi. A (1993) : Contribution à l'étude pluvio-hydrologique du bassin versant de l'oued Melloulou (Maroc oriental). Thèse de doctorat, Univ. Lille, France, 222 p.
- Mondiale. L. B (2010) : Rapport sur le développement dans le monde 2010 : Développement et changement climatique. Pearson Education France.

- Musy. A, Higy. C (2004) : Hydrologie : Une science de la nature (Vol. 21). PPUR presses polytechniques.
- Naoura. J (2012) : Caractérisation hydrologique et qualitatives des eaux de surface du haut bassin de l'Inaouène, Thèse de Doctorat de l'Université de Sidi Mohamed Ben Abdellah, 278p.
- Nathan. R. J, McMahon. T. A (1990): Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Water resources research*, 26 (7), 1465-1473.
- Nejjari. A (2002) : La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin versant du Haut Sebou (Moyen-Atlas septentrional-Maroc). (Doctoral dissertation, Metz).
- Nguimalet. C. R, Orange. D. I. D. I. E. R (2015) : Caractérisation de la baisse hydrologique de la rivière Oubangui à Bangui, République Centrafricaine. In Colloque International sur l'Hydrologie des Grands bassins fluviaux de l'Afrique (pp. 26-30)
- Nicholson. S. E (1989): Long-term changes in African rainfall. *Weather*, 44(2), 46-56.
- Noin. D (1970) : La population rurale du Maroc, PUF, Paris, deux tomes, 279 p. et 341p
- Obda. Kh, Gille. E, Akdim. B (2000) : Application de la méthodologie des profils hydrologiques dans la gestion des ressources en eau : cas des oueds zlou (Moyen-Atlas Septentrional) et Nekor (Rif Central). In *Mosella* 2000, t. xxv, n°3-4, pp. 109-120.
- OMM (1994) : Guide des pratiques hydrologiques - Acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications, OMM n°168, Organisation météorologique mondiale.
- Ouarhache. D (2002) : Sédimentation et volcanismes (effusif et explosif) associés au Rifting triasique et infraliasique dans le Moyen-Atlas Sud-occidental et la Haut Moulouya (Maroc). Doctorat d'Etat Es-Sciences, Université Mohamed V, Faculté Des Sciences, Rabat, 284 pp.
- Pardé. M (1934) : Fleuves et rivières, A. Colin, Paris, 224 p.
- Perrin .C (2005) : Qu'est-ce que la sécheresse ? www.ecologie.gouv.fr.
- Pirt. J, Simpson. M (1983) : The Estimation of river flows. Severn Trent Water Authority.
- Pointet. F (1975) : How to produce and offer fruits of good taste quality. *Revue horticole suisse*.
- Qadem. A (2015) : Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut Sebou (Maroc). Thèse de doctorat, Université de Lorraine).
- Réméniéras. G. (1986) : L'hydrologie de l'ingénieur. 2ème éd. 1976. EDF et Eyrolles ed, Paris.
- Renard. B (2009) : Détection d'évolutions dans les régimes hydrologiques du bassin du Sebou (Maroc) (Doctoral dissertation, irstea).
- RGPH. (2004) : Recensement Général de la Population et de l'Habitat.

- RGPH. (2014) : Recensement General de la Population et de l'Habitat.
- Rhoujjati. A (2007) : Changements paléo-environnementaux et paléo climatiques depuis 21 000 ans 14C dans le Moyen-Atlas marocain : les lacs Ifrah et Iffer. These d'É tat Université Chouaib Doukkali, El Jadida.
- Riad. S (2003) : Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. (Thèse de doctorat), Université Lille F Sciences et Technologies.
- Roche. M (1986) : Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand. Masson Editeur, 288 pp.
- Rodier. J (1996) : L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 8ème éd. Denod, Paris, 1383.
- Royaume du Maroc, "La loi n° 10-95 (1995) : sur l'eau," Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement.
- Royaume Du Maroc, ministère Des Travaux Publics Et Des Communications, Direction De L'hydraulique (1972) : Étude Hydrologique De L'Oum-Er-Rbia. SOFRELEC, Mars ; 138p.
- Rutledge. AT, Daniel. CC (1994) : III Test d'une méthode automatisée pour estimer la recharge des eaux souterraines à partir des enregistrements de débit. Groundwater 32 (2), 180–189.
- Saidi, M. E., Daoudi, L., Aresmouk, M. E., et Blali, A. (2003). Rôle du milieu physique dans l'amplification des crues en milieu montagnard, exemple de la crue du 17 août 1995 dans la vallée de l'Ourika (Haut Atlas, Maroc). Sécheresse, 14(2), 1-8.
- Samaaa. D (2010) : L'homme et l'anthropisation dans la plaine de Guigou. Mémoire de master. 116 p.
- Sauvage. C (1963) : Étages bioclimatiques. Atlas du MAROC : Notices explicatives : Planche n° 6b. Comité national de géographie du Maroc, 44p.
- Secrétariat d 'Etat auprès du Ministère de l 'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Eau (SEEE) (2010) : Etat de l'Environnement du Maroc. Rabat ; 51p.
- Secrétariat d 'Etat auprès du Ministère de l 'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Eau (SEEE) (2008) : Etat De La Qualité Des Ressources En Eau Au Maroc. Rabat, 2p.
- Secrétariat d 'Etat auprès du Ministère de l 'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Eau (SEEE) (2005) :Inventaire Du Degré De Pollution Des Eaux Superficielles, Rapport De Synthèse Bassin Hydraulique D'Oum-Er-Rbia ; Rapport définitif , Béni Mellal.

- Secrétariat d 'Etat auprès du Ministère de l 'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Eau (SEEE) (2007) : Normes de qualité (eaux de surface) , Rabat.
- Secrétariat d 'Etat auprès du Ministère de l 'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Eau (SEEE) (2012) : Politique de l'Eau au Maroc, Rabat.
- Secrétariat d 'Etat auprès du Ministère de l 'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement Département de l'Eau (SEEE) (2000) : Rapport sur l'Etat de l'Environnement du Maroc : Rabat ; 84p
- SEEE (Secrétariat d'État auprès du ministère de l'Énergie des Mines, de l'Eau et de l'Environnement) (2008) : fiche sur le nouveau système d'évaluation de la qualité des eaux, Maroc, 5 p.
- Serbout. R (2001) : Le bassin versant de l'oued Oum er Rébia en amont de Déchra el Oued (moyen-Atlas) : contribution à l'étude des phénomènes hydro-climatiques: thèse. Thèse de doctorat, Nice.
- Shepard. D (1968) : A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference (pp. 517-524).
- Sloto. R. A, Crouse. M. Y (1996) : HYSEP: A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. Water-resources investigations report, 96, 4040.
- Smakhtin. V. U (2001) : Low flow hydrology: a review. Journal of hydrology, 240(3-4), 147-186.
- Smakhtin. V. Y, Hughes. D. A, Creuse-Naudin. E. (1997): Regionalization of daily flow characteristics in part of the Eastern Cape, South Africa. Hydrological Sciences Journal, 42(6), 919-936.
- Soro. T. D, Soro. N, Oga. Y. M. S, Lasm. T, Soro. G, Ahoussi. K. E, Biémi. J (2011) : La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Physio-Géo. Géographie physique et environnement, (Volume 5), 55-73.
- Stromberg. J. C, Beauchamp. V. B, Dixon. M. D, Lite. S. J, Paradzick. C (2007) : Importance of low flow and high flow characteristics to restoration of riparian vegetation along rivers in arid south western United States. Freshwater Biology, 52(4), 651-679.
- Tag. B (1996) : Les potentialités de développement du Moyen-Atlas oriental et leur appréciation par les acteurs locaux/Development possibilities in the eastern Middle Atlas Mountains and their assessment by local actors. Revue de géographie alpine, 84(4), 51-60.
- Tallaksen. L. M (1995) : A review of baseflow recession analysis. Journal of hydrology, 165(1-4), 349-370.

- Tallaksen. L. M, Hisdal. H. E. G. E (1997): Regional analysis of extreme streamflow drought duration and deficit volume. IAHS Publication, 246, 141-150.
- Tallaksen. L. M, Madsen. H, Hisdal. H (2004): Frequency analysis. Hydrological Drought–Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater, edited by: Tallaksen, LM and van Lanen, HAJ, Developments in Water Science, 48, 199-271.
- Taous. A (2005) : Géométrodynamique fluviale ; processus morphe sédimentaires, ajustements spatio-temporels, paléo environnements et mutations des espaces fluviaux. Pub ; FLSH Sais Fès, série : thèses et monographies, n° 11, 425p.
- Termier. H, Dubar. G (1940) : Carte géologique provisoire du Moyen-Atlas septentrional au 1 :200 000. Notes et Mem. Serv. Géol. Maroc, n°23 et notice explicative n°24 bis, 74p.
- Termier. H (1936) : Etudes géologiques sur le Maroc Central et le Moyen-Atlas septentrional. Notes et Mem. Serv. Mines et cartes géol. Maroc.33 :1566p.
- Tharme. R. E (2003) :A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. River research and applications, 19(506), 397-441.
- Thomas,. D. M, Benson. M. A (1970) : Generalization of streamflow characteristics from drainage-basin characteristics.
- Toebes. C, Strang. D. D (1964) : On recession curves, 1. Journal of Hydrology (New Zealand), 3(2), 2-14.
- Uhlenbrook. S, Hoeg. S (2003) : Quantifying uncertainties in tracer based hydrograph separations: a case study for two, three and five component hydrograph separations in a mountainous catchment. Hydrological Processes, 17(2), 431-453.
- Vauchel. P (2004): Hydraccess : Base de données hydrométriques sous Access 2000. Document IRD, Dakar, 21 p.
- Vogel. H. J (1994): Calmodulin: a versatile calcium mediator protein. Biochemistry and cell biology, 72(9-10), 357-376.
- Vogel. R. M, Fennessey. N. M (1994): Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals. Journal of Water Resources Planning and Management, 120(4), 485-504.
- Vogel. R. M, Kroll. C. N (1992): Regional geohydrologic geomorphic relationships for the estimation of low flow statistics. Water Resources Research, 28(9), 2451-2458.
- Vogel. R. M, Kroll. C. N (1996): Estimation of baseflow recession constants. Water resources management, 10(4), 303-320.
- Vogel. R. M, Stedinger. J. R (1987): Generalized storage-reliability-yield relationships. Journal of Hydrology, 89(3-4), 303-327.

- Vogel. R. M, Wilson. I (1996): Probability distribution of annual maximum, mean, and minimum streamflows in the United States. *Journal of hydrologic Engineering*, 1(2), 69-76.
- Wartiti. M. E, Broutin. J, Freytet. P, Larhrib. M, Toutin-Morin.N (1990) : Continental deposits in Permian basins of the Mesetian Morocco, geodynamic history. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 10(1-2), 361-368.
- World Meteorological Organization (WMO) (2008) : *Guide to Hydrological Practices, Vol. I: Hydrology – From Measurement to Hydrological Information*. Sixth edition. Geneva, Switzerland: WMO No 168.
- Yao. A. B, Kouassi. K. L, Koffi. E. K, Goula. B. T. A, Gaye.A. T (2019) : Evolution des impacts potentiels des changements climatiques sur les écoulements de la rivière Lobo, Centre-Ouest de la Côte d’Ivoire. *Afrique Science*, 15, 330-342.
- Yevjevich. V. M (1967) : Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. An (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
- Zelenhasić. E, Salvai. A (1987) : A method of streamflow drought analysis. *Water resources research*, 23(1), 156-168.

- Zumstein. J-F (1978) : Contribution à l’élaboration de cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973, *La Houille Blanche*, n°6.

Annexe



Questionnaire sur les étiages et les tarissements dans le bassin versant de l'oued Srou

Réalisé par : Omar GHADBANE
Etudiant chercheur au cycle doctorale Dynamique des Paysages et Patrimoine
Encadré par le Prof : M.EIGHACHI

N° de Questionnaire : Date : Interrogateur :
Bassin versant : Amont Médiane Aval

I- Informations générales

- 1- Votre âge : < 20 20-40 40-60 > 60
2- Vous êtes : Homme Femme
3- Commune :
4- Lieu de naissance :
5- Depuis quand vous habitez-vous ici ?
6- Votre activité

II- Climat de la zone

- 7- Parle-moi du climat actuel du bassin versant ?
.....
8- Comment elles sont les précipitations (pluviométrie et la neige) dans le passé ?
 Faible
 Moyenne
 Forte Indicateur ?
- 9- Quelle est la période pluvieuse historique ?
 50 60 70 80 90 2000
- 10- Quelle est leur durée ?
 Quelques jours
 Une semaine
 Un mois
- 11- Quelle sont les saisons pluvieuses ?
 Hiver Mois :
 Printemps Mois :
 Eté Mois :

Automne Mois :

12- Est-ce que c'est précipitations dure toute l'année dans le bassin versant ?
.....

13- Comment la température a évoluée dans le bassin versant ?
 Diminuer
 La même
 Augmenter Indicateur ?

14- Quelle est la période la plus chaude que vous avez vécu ?
 50 60 70 80 90 2000

III- Hydrologie

15- Comment il a été le débit du cours d'eau dans le passé ?
 Faible
 Moyen
 Important Indicateur ?

16- Quelle est le maximum du débit observé du cours d'eau ?
.....

17- Vous souvenez de l'année ? Mois ?

18- Avez-vous souvenez des sécheresses hydrologiques remarquables du cours d'eau ?
 Oui Non

19- Si la réponse est Oui, A quelle année sont-elles produites ?

20- Combien t elles durée ?

21- Comment il a été le débit durant cette période ?
.....

22- Est-ce que le cours est devenu à sec ? Oui Non

23- A quelle année été observé ?.....

Indicateurs ? Combien de temps a duré ?

24- La situation hydrologique est la même actuellement du cours d'eau ?
 Oui Non

25- Si la réponse est oui, vous pouvez nous décrire comment -elle changée ?
.....

26- Indicateurs ?
.....

.....27- Vous
avez vécu des années de sécheresses ? Oui Non

28- Si la réponse est Oui, vous pouvez citer ces années :
.....

37- Combien elle s'est durée ?
.....

38- Que souvenez-vous sur ces années ?
.....
.....

IV- Indicateurs des étiages

39- Connaissez-vous la définition des étiages ?
 Oui Non

Si la réponse est Oui on passe à la question suivante, si la réponse est Non on vous propose la définition suivante :

« Le niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné » Roche 1986

40- Comment la population connait-elle que le cours d'eau est en phase d'étiage ?

.....

41- Comment la population connait-elle que le cours d'eau est en phase d'étiage sévère ?

.....

42- Comment la population connait-elle que le cours d'eau est en phase d'étiage extrême ?

.....

V- Détermination des étiages

43- Vous-pouvez nous indiquer à quelle période de l'année sont-ils produits dans le bassin ?

Période des basses eaux Mois :

Période des hautes eaux Mois :

44- Quelle est la durée moyenne des étiages ?

Quelques jours

Une semaine

Un mois

Des mois

45- Quelle est le niveau du débit le plus faible de l'histoire du cours d'eau ?

.....

Indicateurs ?

46- A quelle année s'est-il produit ?

.....

47- Combien de temps cette situation est-elle duré ?

.....

48- Quelles sont leurs origines ?

Sécheresse climatique

Sécheresse hydrologique

Température importante

Prélèvement intense

49- Vous souvenez-vous de quelques indicateurs ?

Niveau d'eau

Qualité des eaux

Végétation

50- Est-ce que ce cours d'eau a subi un étiage absolu ?

Oui Non

51- Si la réponse est Oui vous-pouvez indiquer en quelle année est-il produit ?

.....

52- Est-ce qu'il a touché l'ensemble du cours d'eau ?

.....

53 - Combien de temps cette situation a-t-elle duré ?

.....

54- Quelles sont leurs origines ?

Sécheresse Climatique

Sécheresse hydrologique

Température importante

Prélèvement intense

55- Vous souvenez de quelques indicateurs ?

.....

VI- Détermination des tarissements

56- Comment le débit du cours d'eau diminue pendant la période des étiages ?

.....

57- comment le débit des sources diminue pendant la période des étiages ?

.....

58- Combien de temps dure cette situation ?

.....

59- Quelle est leurs origines ?

- Sécheresse Climatique
- Sécheresse hydrologique
- Température importante
- Prélèvement intense

60- Quelle est le nombre du jour sans pluie avant le tarissement ?

.....

61- Vous souvenez de quelques indicateurs ?

.....

VII- Prélèvements dans le cours d'eau

L'approvisionnement en eau potable

62- D'où vient l'eau potable que vous consommez ?

- Réseau publique Puit Source

63- Si la réponse est la Source, comment vous la gérez ?

.....

Agriculture

64- Est-ce qu'il y a des terres agricoles irriguées ?

- Oui Non

65- Si la réponse est Oui, quelle est la source d'irrigation ?

- Pompage direct à partir du cours d'eau
- Canalisations (seguias)

66- Quelle est le nombre des seguias ?

.....

67- Quelle est la nature des canaux d'irrigations ?

- En béton en sol

68- Quelle est la surface irriguée ?

.....

69- Quelle est le débit prélevé ?

- Durée
- Période.....
- Mois.....

70- Quelles sont les champs cultivés ?

.....

71- Cycle d'irrigation ?

- Journalière Hebdomadaire bimensuel Mensuel
 72- C'est qui le responsable de la gestion des prélèvements ?

73- Sur quel critère vous répartissez l'eau ?

- Temps Volume Autre

74- Est-ce que le cycle concerne :

- Un douar Plusieurs douars

75- Est-ce que la quantité d'eau par rapport aux années précédente :

- Diminue augmente constante

76- En période des étiages, est ce que vous gérez les ressources en eau de la même façon ?

77- En période de sécheresse hydrologique comment vous gérez la ressource en eau de la même façon ?

78- Dans le cas des prélèvements intenses, est ce que le cours d'eau est devenu à sec ?

VIII- Impact des étiages

L'approvisionnement en eau potable

79- Pendant la période des étiages, est ce que le débit de cette source d'approvisionnement est ;
 Le même augmente diminue

Apparition des embâcles

80- Lors de la période des étiages on note l'apparition des embâcles, vous pouvez nous indiquer leurs natures ?

- Embâcles naturels
 Embâcles anthropiques

81-Quelle est leurs positions dans le cours d'eau ?

82- est ce que ces embâcles gênent l'écoulement du cours d'eau ?

- Oui Non

83- Si la réponse est Oui, dans quel endroit du cours d'eau s'est produit ?

Rejets liquides

84- Comment vous débarrassez des rejets liquides ?

- Fosse sauvage réseau d'assainissement Directement sur le cours d'eau

85- Les eaux collectées par le réseau sont rejetées ;

- Sur un cours d'eau
 Sur le sol

86- Vous pouvez nous décrire la situation des cours d'eau en aval des rejets pendant la période des étiages ?

Apparition de la végétation aquatique

87- Pendant la période des étiages est ce qu'il y a un développement de la végétation aquatique ?

- Oui Non

88- Quel est la relation entre le développement de la végétation aquatique et la qualité de l'eau pendant la période des étiages ?

IX- Mémoire du cours d'eau

89- Parle-moi sur votre mémoire sur l'oued (Srou/Chbouka...)

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure II-1: Situation géographique du bassin versant du haut OER et du bassin versant de l'oued de Srou..... | 20 |
| Figure 1-1 : Paramètres morphométriques du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins (MNT 2016)..... | 37 |
| Figure 1-2: Carte des tranches d'altitudes à l'échelle du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)..... | 41 |
| Figure 1-3 : Courbe hypsométrique et histogramme des fréquences des tranches d'altitudes du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins | 43 |
| Figure 1-4 : La dénivelé spécifique au niveau du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassin versant | 47 |
| Figure 1-5 : Cartes des classes des pentes du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins (MNT 2016)..... | 48 |
| Figure 1-6 : Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)..... | 50 |
| Figure 1-7: Profil en long de l'oued de Srou et de ses principaux affluents..... | 53 |
| Figure 1-8 : Carte géologique du bassin versant de l'oued de Srou (feuille de Rabat 1/500000) | 56 |
| Figure 1-9: Facies couplet du Trias (secteur de l'oued Srou, d'après Martin. 1980)..... | 59 |
| Figure 1-10: Carte de la perméabilité du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016 & Feuille de Rabat 1/500000) | 63 |
| Figure 1-11 : Perméabilité (en %) des formations lithologiques du bassin versant de l'oued de Srou et de ces principaux sous bassins..... | 65 |
| Figure 1-12 : Occupation du sol dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 66 |
| Figure 1-13: Les principales forêts du bassin versant de l'oued de Srou (Mnt 2016 & Données CCDRF) | 67 |
| Figure 1-14 : Pourcentage des forêts du bassin versant de l'oued de Srou de la superficie forestière totale..... | 68 |
| Figure 1-15 : Changement de la densité du couvert végétal entre le nord-est du bassin (forêt de Kerrouchen photo à gauche) et au sud-est (forêt d'Ait Lahsen à droite)..... | 69 |
| Figure 1-16: Photos des espèces dominants dans les forêts du bassin versant de l'oued de Srou : le cèdre (photo à gauche) et le Chêné vert (photo à droite) | 69 |
| Figure 1-17: Les matorrals entre Lakbab et Kerrouchen (photo à droite) et en aval du Srou (photo à gauche) | 70 |
| Figure 1-18: Photos des terrains de pâturage au nord-est du bassin versant de l'oued de Srou (photo à gauche) et au sud-ouest (photo à droite) | 70 |
| Figure 1-19: Paysages agraires à la large vallée de Srou à côté de lkbab | 71 |

| | |
|--|-----|
| Figure 1-20: Sommets d'Assif Zad dégradées par l'érosion hydrique | 72 |
| Figure 2-1:Les majeurs tribus de la région Khénifra y compris celles du Bv de Srou (Drouin, 1975)..... | 77 |
| Figure 2-2 : Superficie des communes qui appartient au bassin versant de l'oued de Srou | 79 |
| Figure 2-3:Evolution de la population du bassin versant de l'oued de Srou (RGPH 1994, 2004 et 2014)..... | 80 |
| Figure 2-4:Variation de la densité de la population dans les communes du bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)..... | 82 |
| Figure 2-6 : Nature du réseau des seguias dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 84 |
| Figure 2-6 : La durée du cycle d'irrigation dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 84 |
| Figure 2-8:Seguia en béton en fonction | 85 |
| Figure 2-8:Seguia en béton abandonnée | 85 |
| Figure 2-10 : Pompage direct de l'oued de Chbouka | 85 |
| Figure 2-102 : Puit équipé d'une pompe verticale avec un moteur diesel..... | 85 |
| Figure 3-1 : Les grands bassins hydrauliques du Maroc (MNT 2016) | 94 |
| Figure 3-2:Eaux souterraines et écoulements de surface par bassin hydrographique (SEEE, 2013)..... | 95 |
| Figure 3-3: Evolution du nombre de grands barrages (SEEE, 2013) | 96 |
| Figure 3-4:affectation et origine des eaux mobilisées (SEEE, 2013) | 97 |
| Figure 3-5:Apport des eaux superficielles par bassin versant au Maroc (SEEE,2013)..... | 99 |
| Figure 3-6: Bassin versant de l'Oum-Er-Rbia (ABHOER) | 100 |
| Figure 3-7 : Photos illustrant la variation saisonnière des débits entre les hautes eaux (à droite) et les basses eaux (à gauche) de l'oued Assif N'douma (Photos prises entre août 2016 et janvier 2018)..... | 105 |
| Figure 3-8: Régime hydrologique de l'oued de Srou à la station de Chacha N'mallah (1978-2016)..... | 106 |
| Figure 3-9: Photos illustrant la variation entre la sécheresse (à gauche) les hautes eaux (à droite) de l'oued Assif Tamharrart (entre août 2016 et janvier 2018) | 107 |
| Figure 3-10: Les lois qui régissent les phénomènes des tarissements (Dewandel et al., 2002 in Lang, 2007) | 117 |
| Figure 3-11: Distinction entre la courbe enveloppe et les courbes séquences – La Mortagne à Autrey- Ste-Hélène (2003) (Lang, 2007). | 119 |
| Figure 3-12: Sélection des débits de la courbe de décroissance – La Mortagne à Autrey-Ste-Hélène (2003) (Lang, 2007). | 120 |
| Figure 4-1: la position des stations hydro climatiques par rapport au bassin versant de l'oued de Srou (MNT 2016)..... | 129 |
| Figure 4-2: Les stations pluviométriques et hydrométriques du bassin de Srou..... | 131 |
| Figure 4-3 : Présentations des altitudes des différentes stations pluviométriques | 132 |
| Figure 4-4:Présentations des altitudes des différentes stations pluviométriques | 132 |
| Figure 4-5: Chronogramme des stations utilisées dans l'étude hydro climatique du bassin versant de l'oued de Srou | 133 |
| Figure 4-6: Exemple des corrélations mensuelles pour la station de Chacha N'mallah..... | 136 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4-7: Pluviométrie cumulée aux stations de Tamchacht, Aval Elhri et Chacha N'mallah par rapport à la station de références d'Ifrane (1976-2016)..... | 138 |
| Figure 4-8:Méthode des doubles cumuls appliquée aux données thermométriques (St Ahmed Elhansali et Taghat 1986-2016) | 139 |
| Figure 4-9: Résultats de la méthode vecteur régional (1976-2016) (MNT 2016) | 141 |
| Figure 4-10: Application de la méthode Cusum sur les données des stations pluviométriques (Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah) pour la chronique 1976-2016..... | 143 |
| Figure 5-2:Périodes humides dans le bassin versant de l'oued de Srou..... | 147 |
| Figure 5-2: Durée des périodes pluvieuses dans le passé dans le bassin versant de l'oued de Srou | 147 |
| Figure 5-3 : Spatialisation des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou (Méthode de Thiessen) (1976-2016) (MNT 2016)..... | 150 |
| Figure 5-4 : Spatialisation des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou (Méthode d'Inverse distance) (1976-2016) (MNT 2016) | 153 |
| Figure 5-5 : Spatialisation des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou (Méthode Krigeage) (1976-2016) (MNT 2016)..... | 155 |
| Figure 5-6: La pluviométrie annuelle dans les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah | 156 |
| Figure 5-7:Evolution interannuelle de la pluviométrie à Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah avec les indices centrés réduits et les totaux annuels pondérés (1976-2016 | 159 |
| Figure 5-8:Ajustement statistique des pluies annuelles des stations du bassin versant de l'oued de Srou à la loi Rac Normale (1976-2016)..... | 161 |
| Figure 5-9: Fréquence des pluies annuelles des stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la chronique (1976-2016)..... | 161 |
| Figure 5-10 : Pluviométrie moyenne mensuelle calculée pour le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et le bassin versant de l'oued de Srou pour la chronique (1976-2016)..... | 163 |
| Figure 5-11 : Spatialisation des pluies mensuelles dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 164 |
| Figure 5-12 : Variation des CMP des stations de Tamchacht, Aval Elhri et Chacha N'mallah | 166 |
| Figure 5-13:Nombre des jours pluvieux et non pluvieux dans les stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 167 |
| Figure 5-14:Fréquence des pluies journalières par classe dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 169 |
| Figure 5-15:Moyenne des jours pluvieux par mois dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 170 |
| Figure 5-16:Variation de la température moyenne annuelle et tendance dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016) | 171 |
| Figure 5-17 : Cusum de la température des stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 172 |
| Figure 5-18:Coefficient mensuel de température des stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 174 |

| | |
|---|-----|
| Figure 5-19:Variation annuelle de l'ETP dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 178 |
| Figure 5-20:Variation mensuelle de l'ETP dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 179 |
| Figure 5-21 : Variation du bilan hydrique dans le sous bassin versant de l'oued de Chbouka et le bassin versant de l'oued de Srou (1986-2016) | 180 |
| Figure 6-1 : Années excédentaires dans le bassin versant de l'oued de Srou | 185 |
| Figure 6-2 : Variabilité des débits annuels et des lames d'eau écoulées dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah Période 1976-2016 | 186 |
| Figure 6-3 : Variabilité des coefficients d'hydraulicité dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016) | 187 |
| Figure 6-4 : Application l'indice de NICHOLSON et le Filtre Passe Bas de HANNING d'ordre 2 aux débits annuels des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah | 188 |
| Figure 6-5: Ajustement des modules annuels des stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah à la loi Log-normale (1976-2016)..... | 189 |
| Figure 6-6:Variation du CMD dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 191 |
| Figure 6-7: Moyenne des débits journaliers sur la période 1976-2016 des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah..... | 192 |
| Figure 6-8 : Les débits journaliers classés des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 193 |
| Figure 6-9:Fréquence des débits journaliers dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 194 |
| Figure 6-10:Variation du Débit minimum annuel et nombre de jours d'occurrence dans les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 195 |
| Figure 6-11:Occurrence des Qmin dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 196 |
| Figure 6-12:Relation pluie-débits dans les stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 198 |
| Figure 6-13:le déficit d'écoulement dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 199 |
| Figure 6-14:Corrélation entre les pluies et les débits dans les stations de d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 200 |
| Figure 6-15 : Relation pluies débits à l'échelle mensuelle dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 200 |
| Figure 6-16: Déficit d'écoulement mensuel dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 201 |
| Figure 7-1: La hauteur et largeur minimale de l'oued de Srou..... | 207 |
| Figure 7-2: Occurrence et durée des étiages dans le bassin versant de l'oued de Srou | 208 |
| Figure 7-3: Exemple d'identification du QMNA pour la station d'Aval Elhri en 1979 | 209 |
| Figure 7-4:Fréquence d'occurrence des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 210 |

| | |
|---|-----|
| Figure 7-5: Variabilité des QMNA et segmentation de la chronique (1976-2016) des stations Chacha N'mallah et d'aval Elhri | 211 |
| Figure 7-6 : Cusum des QMNA des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 212 |
| Figure 7-7: Ajustement des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou à la loi Log-normal (1976-2016)..... | 214 |
| Figure 7-8 : Exemple de VCND de durées 1, 10 et 30 jours – La Moselle à Epinal en 1976, d'après les données de la Banque HYDRO (Lang, 2011)..... | 219 |
| Figure 7-9: Stabilité des débits d'étiages dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou, comparaison entre l'année la plus excédentaire (2010) et l'année la plus déficitaire (2008) . | 222 |
| Figure 7-10 : Occurrence des VCND des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 224 |
| Figure 7-11 : Variation des VCND dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 224 |
| Figure 7-12: Ajustement des VCND des stations du bassin versant de l'oued de Srou à la loi Log-normal (1976-2016)..... | 229 |
| Figure 7-13: Illustration de la contrainte de l'échelle calendaire associée au QMNA (LANG, 2007)..... | 231 |
| Figure 7-14: Variation annuelle des QMNA et des VCN30 dans les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016) | 232 |
| Figure 7-15: Corrélation entre les QMNA et les VCN30 des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016) | 234 |
| Figure 7-16 : Exemple des courbes des débits classés annuelles pour la station de Chacha N'mallah | 237 |
| Figure 7-17 : Présentation des différents débits classés des stations d'Aval Elhri pour la période 1976-2016..... | 240 |
| Figure 7-18 : Courbe des débits classés des années humides (bleu), années moyennes (vert) et des années sèches (rouges) des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah | 242 |
| Figure 7-19: Ajustement graphique des DC des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah à la loi Log-normal..... | 245 |
| Figure 8-2: Sources d'Arroggio | 250 |
| Figure 8-2: Source sur la route de Kerrouchan | 250 |
| Figure 8-3: Technique de sélection des débits de tarissement en procédant à partir de la fin de l'épisode (Gille & Lang, 2006) | 254 |
| Figure 8-4 : Algorithme d'extraction des courbes séquences (Gille & Lang, 2006). | 255 |
| Figure 8-5 : Exemple des phases obtenues en fonction d'hydrogramme et d'hyétogramme pour la station d'Aval Elhri pour l'année 2009..... | 256 |
| Figure 8-6: Fréquence d'apparition du coefficient de tarissement au cours de l'année dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 257 |
| Figure 8-7: Fréquences des durées des épisodes de tarissement dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 258 |
| Figure 8-8: Régime moyen des coefficients de tarissements des débits des stations du bassin de l'oued de Srou (1976-2016) | 260 |

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure 8-9:Corrélation entre les débits Q_0 et les débits à t jours (Q_t) des courbes séquences des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 264 |
| Figure 8-10:Ajustement des at à une courbe exponentielle et détermination du coefficient de tarissement de maillet pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)... | 265 |
| Figure 8-11:Histogrammes de distribution des α séquences des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 266 |
| Figure 8-12 : Exemple de la procédure d'interpolation linéaire dans le tracé du débit de base pour la station d'Aval Elhri. | 270 |
| Figure 8-13:Variabilité annuelle du débit de base dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 271 |
| Figure 8-14 : Variation des IDB dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 272 |
| Figure 8-15:Variation mensuelle des IDB dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 272 |
| Figure 9-1:Indicateurs statistiques de débit suggérés par Lang (2011) pour déterminer l'état de la situation hydrologique en étiage..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 9-2:Evolution de l'histogramme de distribution des débits moyens journaliers et du nombre de classes imposé - station d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 287 |
| Figure 9-3:Le débit modal comparé aux débits caractéristiques des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 288 |
| Figure 9-4:Variation des périodes d'étiages en fonction du seuil débit modal pour les stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 289 |
| Figure 9-5:Années et jours d'étiages pour chaque seuil au niveau des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 290 |
| Figure 9-6:Pourcentage d'année sans étiage (en bleu) et année avec étiage supérieur à 90 jours (en rouge) en fonction du seuil choisi au niveau des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 291 |
| Figure 9-7 : Classification des indicateurs d'étiages pour les deux stations du bassin versant de l'oued de Srou de plus important au plus faible (1976-2016)..... | 293 |
| Figure 9-8 : Seuils d'étiages pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou..... | 296 |
| Figure 9-9 : présentation des différents seuils d'étiage dans le bassin versant de l'oued de Srou | 297 |
| Figure 9-10 : Nombre des jours en dessous des seuils pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 298 |
| Figure 9-11:Illustration de la détection d'épisodes d'étiage vis-à-vis d'un seuil. Figure modifiée d'après Fleig et al. (2005). | 300 |
| Figure 9-12:Définition des épisodes d'étiage selon la procédure « Sequent Peak Algorithm». Figure modifiée d'après Fleig et al. (2005)..... | 301 |
| Figure 9-13:Définition des épisodes d'étiage selon la procédure « Sequent Peak Algorithm » pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 301 |
| Figure 10-2 : Ecoulement de l'oued Assif Tamharrart en mois de juin 2016..... | 308 |
| Figure 10-2: Ecoulement de l'oued Assif N'douma en mois juin 2016 | 308 |

| | |
|---|-----|
| Figure 10-4:Photo d'Assif Tamharrart vide en mois de janvier 2016 | 308 |
| Figure 10-4:Photo d'oued Arrogo vide en janvier 2016 | 308 |
| Figure 10-5:Localisation des points de jaugeages et de contrôle de la qualité des eaux de surface (MNT 2016) | 310 |
| Figure 10-6 : Echelle limnimétrique installée sur l'oued de Srou et sur l'affluent Assif N'douma | 311 |
| Figure 10-7:Schéma de la section transversale d'un cours d'eau montrant l'emplacement des points de mesure (OMM, 1994). | 312 |
| Figure 10-8 : Mesure de la largeur et de la profondeur de la section du cours d'eau..... | 313 |
| Figure 10-9 : Préparation et nettoyage de la section de jaugeage (Assif Tamharrart)..... | 313 |
| Figure 10-10 : Micro-moulinet de type OTT avec les principaux éléments constitutifs | 314 |
| Figure 10-12 : Mesure du débit et de la hauteur d'eau dans les hautes eaux (janvier 2018) et les basses eaux (août 2017) (station d'Assif N'douma)..... | 316 |
| Figure 10-11 : Courbe de tarage des stations de l'oued de Srou et ses affluents l'oued de Chbouka et Assif Tamharrart (2017-2018)..... | 317 |
| Figure 10-13 : Variation mensuelle des débits dans le bassin versant de l'oued de Srou et de ses affluents durant l'année hydrologique 2017-2018 | 318 |
| Figure 10-14:Profils hydrologiques du cours d'eau principal de l'oued de Srou | 320 |
| Figure 10-15 : Carte du rendement moyen des bassins unitaires du bassin versant de l'oued de Srou (à partir de 27 valeurs de débit) (MNT 2016)..... | 322 |
| Figure 10-16 : Construction des courbes de tarissement pour le bassin versant de l'oued de Srou et de ses bassins unitaires | 325 |
| Figure 10-17:Evolution de la température de l'eau dans le Bv de Srou et ses affluents (2017-2018)..... | 329 |
| Figure 10-18 : Variation du pH dans le bassin versant de l'oued de Srou et dans ses affluents (2017-2018)..... | 330 |
| Figure 10-19:Variation de la conductivité électrique dans le bassin versant de l'oued de Srou et dans ses affluents (2017-2018)..... | 331 |
| Figure 10-20 : Variation de l'oxygène dissous dans le bassin versant de l'oued de Srou et dans ces affluents (2017-2018)..... | 332 |
| Figure 10-21 : Système d'assainissement liquide dans le bassin versant de l'oued de Srou.. | 334 |
| Figure 10-23:Rejet direct des eaux usées du centre Elhri dans l'oued de Chbouka..... | 334 |
| Figure 10-23:Développement de la végétation aquatique en aval des rejets d'Elhri..... | 334 |
| Figure 10-24: Prolifération des algues dans les affluents de l'oued de Srou..... | 335 |
| Figure 10-26 : Bloc d'embâcles végétaux (pont en aval du Kerrouchen)..... | 336 |
| Figure 10-26:Sédiments alluviale dans le lit de l'oued de Srou | 336 |
| Figure 10-27:Accumulation des embâcles au niveau du pont sur Assif Tamharrart | 336 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau 1-1 : Les superficies et les périmètres du bassin versant de l'oued de Srou ainsi ses principaux sous bassins | 36 |
| Tableau 1-2 : Les valeurs de KG calculer pour le bassin de Srou ainsi pour ses sous bassins | 38 |
| Tableau 1-3 : Paramètres du rectangle équivalent pour le bassin du Srou ainsi ses sous bassins | 39 |
| Tableau 1-4:Tranches d'altitudes du bassin versant de l'oued de Srou..... | 40 |
| Tableau 1-5:Tranches d'altitudes des sous bassins de l'oued Srou..... | 42 |
| Tableau 1-6:Altitudes caractéristiques du bassin versant de l'oued Srou et ses sous bassins . | 44 |
| Tableau 1-7 : La pente moyenne du bassin versant de l'oued de Srou et ses sous bassins élémentaires..... | 45 |
| Tableau 1-8: Indice de pente globale pour le bassin versant de l'oued de Srou et ses sous bassins | 46 |
| Tableau 1-9:Classification de l'O.R.S.T.O.M du relief | 46 |
| Tableau 1-10:Les longueurs totales des cours d'eau du bassin versant de l'oued de Srou ainsi de ces principaux affluents | 51 |
| Tableau 1-11 : Densité de drainage du bassin versant de l'oued de Srou et de ses sous bassins | 54 |
| Tableau 2-1:Evolution démographique de la population dans les communes du bassin versant de l'oued de Srou (RGPH : 1994, 2004 et 2014). | 81 |
| Tableau 2-2: Effectif du cheptel (en millier de tête) au niveau des communes rurales du bassin versant de l'oued de Srou | 84 |
| Tableau 2-3 : Caractéristiques physico-chimiques des margine (Amirantes, 1999)..... | 87 |
| Tableau 2-4: Présentation des principales carrières du bassin versant de l'oued de Srou (ministère d'équipement, 2012)..... | 87 |
| Tableau 3-1: Répartition géographique des ressources en eaux souterraines exploitables (SEEE, 2013)..... | 93 |
| Tableau 3-2:Principales nappes de la zone d'action de l'ABHOER (Source : ABHOER) ... | 102 |
| Tableau 3-3: Domaine d'utilisation des eaux du bassin de l'Oum-Er-Rbia (ABHOER)..... | 103 |
| Tableau 3-4: Barrage du grand bassin de l'Oum-Er-Rbia (Source : ABHOER) | 103 |
| Tableau 3-5:Résumé des lois appliquées aux débits d'étiage (ABI-ZEID, 1997)..... | 112 |
| Tableau 4-1: Stations pluviométriques..... | 130 |
| Tableau 4-2: Présentation des stations thermométriques | 130 |
| Tableau 4-3: Présentation des stations hydrométriques du bassin versant de l'oued Srou..... | 131 |
| Tableau 4-4:lacunes observées dans les séries pluviométriques pour la chronique 1976-2016 | 134 |
| Tableau 4-5:Corrélation pluviométrique mensuelle des mois manquants (1976-2016) | 136 |
| Tableau 4-6:Pourcentage des corrélations pour l'ensemble des stations pluviométrique (1976-2016)..... | 137 |
| Tableau 4-7:Matrice de corrélation des stations pluviométriques (1976-2016)..... | 138 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 4-8: Coefficient de corrélation obtenu par la MVR (1976-2016)..... | 140 |
| Tableau 5-1:Evaluation des précipitations annuelles (chronique 1976-2016) par la méthode de Thiessen..... | 151 |
| Tableau 5-2: Résultat de l'évaluation des précipitations annuelles (chronique 1976-2016) par la méthode d'Inverse distance | 152 |
| Tableau 5-3: Résultat de l'évaluation des précipitations annuelles (chronique 1976-2016) par la méthode Krigeage | 154 |
| Tableau 5-4:Variabilité de la pluviométrie moyenne annuelle dans les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 156 |
| Tableau 5-5 : Variabilité de la pluviométrie moyenne annuelle dans les stations Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah (1986-2016) | 157 |
| Tableau 5-6:Découpage de la chronique pluviométrique (1976-2016) des trois stations ; Tamchachat, Aval Elhri et Chacha N'mallah | 159 |
| Tableau 5-7:Pluviométrie annuelle fréquentielle dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la période (1976-2016) | 162 |
| Tableau 5-8:Variation de la moyenne des jours pluvieux et de l'intensité pluviométrique en fonction de la seuil pluviométriques..... | 168 |
| Tableau 5-9 : Variabilité de la température moyenne annuelle dans les stations Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 172 |
| Tableau 5-10 : découpage de la chronique pour la station Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 173 |
| Tableau 5-11: Température moyenne mensuelle dans les stations de Taghat et d'Ahmed Elhansali (1986-2016)..... | 174 |
| Tableau 5-12:Coefficient de corrélation qui en fonction de la latitude du lieu..... | 177 |
| Tableau 5-13 : Résultats du bilan hydrique dans le bassin versant de l'oued de Srou et le sous bassin versant de l'oued de Chbouka (1986-2016) | 181 |
| Tableau 6-1 : Mesure de l'irrégularité inter annuelle des débits des stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016) | 187 |
| Tableau 6-2:Résultats de l'analyse de la variabilité annuelles des modules des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah..... | 188 |
| Tableau 6-3: Module annuel fréquentiel dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou pour la période (1976-2016)..... | 189 |
| Tableau 6-4: Coefficients de variation des modules hydrologiques mensuels des stations d'aval Elhri et Chacha N'mallah période (1976-2016) | 192 |
| Tableau 6-5: Les coefficients d'écoulement moyen annuels dans le Srou (1976-2016) | 198 |
| Tableau 7-1:Découpage de la chronique (1976-2016) des QMNA des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah | 213 |
| Tableau 7-2:Fréquence de retour pour les QMNA dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 215 |
| Tableau 7-3:indice de sévérité d'étiage des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 216 |
| Tableau 7-4 : Les VCNd de la station d'Aval Elhri (1976-2016)..... | 220 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 7-5 : Les VCNd de la station de Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 221 |
| Tableau 7-6 : Analyse de variation entre les VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou | 223 |
| Tableau 7-7 : Corrélation entres les VCNd des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 223 |
| Tableau 7-8:Analyse de la variation des VCNd dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 225 |
| Tableau 7-9:Rangs des VCNd des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 227 |
| Tableau 7-10 : Fréquences d'apparition des VCNd du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 230 |
| Tableau 7-11:Paramètres de la variation des VCN30 et des QMNA des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 233 |
| Tableau 7-12:Domaine d'utilisation des DC dans le monde (Smakhtin, 2001) | 239 |
| Tableau 7-13:Les débits caractéristiques dans le bassin du Srou (1976-2016)..... | 241 |
| Tableau 7-14: Calcule de Qb pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 241 |
| Tableau 7-15:Calcule de l'indice Qb pour les stations du bassin versant de l'oued de Srou . | 242 |
| Tableau 7-16 : Le moyen des débits classés annuels de la chronique (1976-2016) des stations du bassin versant de l'oued de Srou | 243 |
| Tableau 7-17:Résultats du test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 5% pour décider si la distribution de l'échantillon est en adéquation avec la loi Log-normale pour les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1978-2016)..... | 244 |
| Tableau 7-18:Fréquence de retour des débits caractéristiques des stations d'Aval Elhri et de Chacha N'mallah (1978-2016)..... | 246 |
| Tableau 7-19:Les débits caractéristiques des étiages des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 247 |
| Tableau 8-1:Nombre des phases de tarissements dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016)..... | 256 |
| Tableau 8-2:Caractéristiques des durées des épisodes de tarissements dans le bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 258 |
| Tableau 8-3:Variation des coefficients de tarissement dans les stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016) | 259 |
| Tableau 8-4 : Ajustements s des α séquences de la chronique (1976-2016) des stations du bassin versant de l'oued de Srou aux différentes lois de probabilité | 267 |
| Tableau 8-5: α maître, α modal, α médian, α moyen et α de fréquences 0,25 et 0,75 des stations du bassin versant de l'oued de Srou (1976-2016). | 267 |
| Tableau 9-1:Variation des débits modaux en fonction des classes choisis pour les stations d'Aval Elhri et Chacha N'mallah (1976-2016)..... | 288 |
| Tableau 9-2:Résumé des indices d'étiage et retenus dans cette étude | 292 |
| Tableau 10-1: Caractéristiques géologiques des sous bassins du bassin versant de l'oued de Srou avec écoulement pérenne | 308 |
| Tableau 10-2: Cordonnées et codification des points de jaugeages..... | 309 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 10-3: Organigramme des campagnes de jaugeages..... | 315 |
| Tableau 10-4: Phases utilisées pour l'identifications des coefficients de tarissement du bassin versant de l'oued de Srou et ses bassins unitaires | 324 |
| Tableau 10-5:Grille générale de la qualité des eaux de surface (SEEE, 2007)..... | 328 |