

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département des sciences et Technique



N°Ref :.....

Memoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Sciences Hydrauliques

**Méthodologie d'estimation de l'écoulement pluvial
d'un bassin versant de l'oued Rhumel-Boumerzoug
Nord-Est Algérien.**

Réalisé par :
-Mezaache Hadjer
-Zeghilet Nassira

Soutenu devant le jury :

M.Moussouni A.
Mme Benchaïba L.
M. Khelalfa M.

Président
Examinateur
Promoteur

Année universitaire : 2015/2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً

فَسَالَتْ أَوْدِيَةً بِقُدْرِهَا

فَأَحْتَمَلَ السَّبِيلَ

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمَ

Remerciement

Nous remercions ALLAH qui nous a aidé à réaliser ce travail qui nous a donné la concentration, la patience et la force.

Nous tenons à remercier notre encadreur:

Mr. Khelalfa.Mohamed

qui nous a orienté et guidé le long de ce présent travail.

Nous remercierons également l'O.N.M pour nous avoir permis d'accéder aux données climatique dont nous avons besoin pour la réalisation de ce travail et qui nous a été d'une réelle utilité.

Merci

Dédicace

A Mon père et ma mère

Vous êtes pour moi un sujet de fierté.

Vous m'avez toujours appris le sens de la responsabilité, de

La raison, du devoir et de la confiance en soi.

Au de là de mots et des phrases, aucune parole ne me saurait

Exprimer mon éternel.

Attachement, mon profond amour, ma perpétuelle affection

et l'infinie gratitude qui je vous dois.

Je sais que vous étiez toujours fière de moi j'espère que vous

Le serez plus aujourd'hui.

Que dieu vous garde et vous alloue bonne santé, bonheur,

Prosperité et longue vie.

A me chère frères : ABD ELHAKE, YUCEF et mon cher

ABD EL GHANI.

A mes chères sœurs : FADILA et AMEL.

A les deux fleurs SENDOS et SELSEBIL.

A toute la famille et les amies.

A mon fiancer BOUZID tous l'amour tous fidèle.

Votre place dans mon cœur est particulière.

NASSIRA

Dédicace

Avant tous je remercie ALLAH tout puissant qui m'a
éclairé le bon chemin et qui m'a donné la force

Et la concentration.

A mon prophète MOUHAMED le clair de cœur,
pupille d'œil.

A mes très chers parents qui sont la lumière de ma vie
qui m'ont appris le respect et l'amour du travail

AMAR et MOURA.

A ma belle petite sœur MERJEM tout l'amour tout
fidèle.

A mes frères : SEDJKE et Abd el Ghanie.

Je dédie ce travail (le fruit de 5 ans d'études
universitaire) à mon centre universitaire "Centre
Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila" le centre
de vouloir, le centre d'espoir.

A mon encadreur MR. KHELAL FA
MOHAMED tout respect tout estime.

A toute les amies.

A tous l'HYDRAULICIENS
MUSULMANS.

HADJER

Abstract :

The flow of the training is a complex hydrological phenomenon. It results from the transformation of rainfall across a large number of processes taking place simultaneously.

Rainfall and intra zonal factors have a great influence on the flow in the basin of Oued El Rhumel.

Stormwaater flow exceptional floods constituted the bulk of the water resource for the dam of Beni Haroune, as it can cause devastating floods. Its quantification remains problematic.

The method offered in this study mainly based on the quantification of frequency maximum flow rate from the statistical treatment of the maximum daily rain and also the annual maximum flow data. The comparison between these two methods gives us an approach to the flow that can be applied to other watershed.

Keywords : flow, maximum daily rainfall, the maximum flow.

Résumé :

La formation de l'écoulement est un phénomène hydrologique complexe. Il résulte de la transformation de la pluie à travers un grand nombre de processus qui se déroulent simultanément. Les facteurs pluviométriques et intra zonaux ont une grande influence sur l'écoulement dans le bassin d'oued el Rhumel-Boumerzoug.

L'écoulement pluvial des crues exceptionnelles constitue l'essentiel de la ressource hydrique pour le barrage de Beni Haroune, comme il peut engendrer des inondations dévastatrices. Sa quantification reste problématique.

La méthode proposée dans cette étude basée essentiellement sur la quantification de débit maximum fréquentielle à partir du traitement statistique de la pluie journalière maximale et également de la donnée de débit maximum annuel. La comparaison entre ces deux méthodes nous donne une approche de l'écoulement qui peut appliquer à d'autre bassin versant.

Mots clés : L'écoulement, pluie journalière maximale, débit maximum.

ملخص:

الجريان هو ظاهرة هيدرولوجية معقدة، يتكون نتيجة تحول مياه الامطار عبر مراحل متعددة تحدث في ان واحد. العوامل المناخية والجغرافية لها تأثير كبير على الجريان في واد الرمال-بومرزوق.

جريان امطار السيول الاستثنائية يمثل السبب الرئيسي في المورد الهيدروليكي لسد بني هارون، كما يمكن أن يسبب فيضانات مدمرة، غير أن تحديد كمية تبقى إشكالية.

الطريقة المعتمدة في هذه الدراسة تركز اساسا على تحديد كمية التدفق الأعظمي الترددي على أساس معالجة إحصائية للإمطار اليومية الأعظمية وبالمقابل معطيات التدفق الأعظمي السنوي. المقارنة بين هاتين الطريقتين تعطينا مقاربة لكمية الجريان والتي يمكن تطبيقها على احواض اخرى.

الكلمات المفتاحية: الجريان، التساقط اليومي الأعظمي، التدفق الأعظمي.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I : Recherche bibliographique..... | 2 |
| Introduction..... | 2 |
| I.1. Genèse et transfert du ruissellement..... | 2 |
| I.2.Mécanismes de formation du ruissellement de surface..... | 2 |
| I.2.1.Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration..... | 2 |
| I.2.2.Ruissellement de surfaces saturées..... | 3 |
| I.2.3. Ruissellement de surfaces imperméables..... | 4 |
| I.3.Les procédures et les formules d'estimation de débit | 5 |
| I.3.1.Méthode de Caquot..... | 6 |
| I.4.Temps de concentration..... | 7 |
| I.4.1.Formule de Giandotti..... | 7 |
| I.4.2.Formule de Sogreah..... | 7 |
| I.4.3.La méthode de Kirpich..... | 8 |
| I.4.4. La méthode de Boutaoutaou..... | 8 |
| Conclusion..... | 9 |
| Chapitre II : Aperçu Géographique et Description Physiographique..... | 10 |
| Introduction..... | 10 |
| II.1.Aperçu géographique..... | 10 |
| II.1.1.Le bassin versant de Kebir El Rhume..... | 10 |
| II.1.2.Le sous bassin de Rhumel-Boumerzoug..... | 12 |
| II.2.Description physiographique..... | 13 |
| II.2.1.Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Rhumel– Boumerzoug..... | 13 |
| II.2.2.les caractéristiques hydrographiques du bassin versant de l'oued Rhumel-Boumerzoug | 15 |
| II.3.Le Relief..... | 19 |

| | |
|---|-----------|
| II.3.1. Les grands ensembles du relief..... | 19 |
| II.3.2. Les altitudes..... | 20 |
| II.3.3. Les pentes..... | 21 |
| II.4. Les grands ensembles géologiques..... | 22 |
| II.4.1. La nappe néritique..... | 22 |
| II.4.2. Les nappes telliennes | 22 |
| II.4.3. La nappe numidienne..... | 23 |
| II.4.4. Les formations post-nappent..... | 24 |
| II.5. Capacités de perméabilité des formations lithologiques. | 25 |
| II.5.1. Les formations perméables..... | 25 |
| II.5.2. Les formations imperméables..... | 26 |
| Conclusion | 27 |
| | |
| Chapitre III : Les Caractéristiques Climatiques du Bassin..... | 28 |
| Introduction..... | 28 |
| III.1. Répartition de station météorologique dans la zone d'étude..... | 28 |
| III.2. Les Précipitations..... | 28 |
| III.2.1. Variabilité annuelle des précipitations..... | 29 |
| III.2.2. Variation mensuelle des précipitations..... | 33 |
| III.2.3. Les variations saisonnières..... | 34 |
| III.3. Les Températures..... | 34 |
| III.3.1. Température moyennes annuelles..... | 35 |
| III.3.2. Température moyennes mensuelle..... | 35 |
| III.3.3. Relation précipitations –températures..... | 36 |
| III.4. Evapotranspiration..... | 37 |
| Conclusion..... | 38 |
| | |
| Chapitre IV : Analyse de l'écoulement fréquentielle..... | 40 |
| Introduction..... | 40 |
| III.1. Collecte des données pluviométriques..... | 40 |
| IV.1.1. Analyse statistique..... | 41 |
| IV.2. Traitement des données pour chaque sous bassin..... | 46 |

| | |
|---|-----------|
| IV.2.1. Détermination de la pluie moyenne journalière maximale..... | 46 |
| IV.2.2.Détermination du coefficient de variation..... | 47 |
| IV.2.3.Détermination du coefficient climatique | 47 |
| IV.3.Estimation de pluie maximum durant le temps de concentration..... | 48 |
| IV.3.1.Pluie journalière maximale fréquentielle..... | 48 |
| IV.3.2. Le temps de concentration..... | 48 |
| IV.3.3.Estimation des pluies de courte durée..... | 49 |
| IV.4. Calcul de coefficient de l'écoulement..... | 50 |
| IV.5. Calcul de l'intensité de l'écoulement..... | 51 |
| IV.6.Estimation de la valeur de débit fréquentiel..... | 52 |
| IV.7.Analyse fréquentielle des débits maxima annuels..... | 53 |
| IV.7.1.La méthode grapho-analytique d'Alekseev..... | 54 |
| IV.7.2.La méthode de Gumbel ou double exponentiel..... | 57 |
| IV.8.Vérification des méthodes d'estimation de débit maximum fréquentiel..... | 59 |
| IV.9.Cartographie de l'écoulement pluvial des sous-bassins d'Oued Rhumel Boumerzoug..... | 61 |
| Conclusion..... | 64 |
| Conclusion générale..... | 66 |
| Référence Bibliographique | |
| Annexes | |

Liste des Tableaux

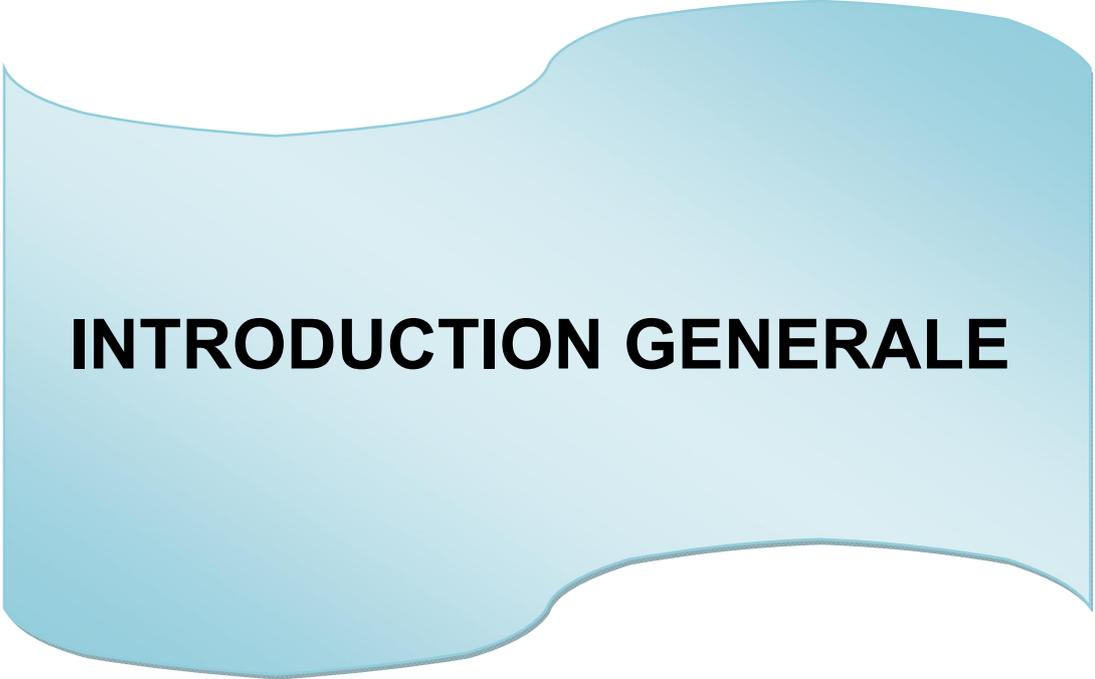
| Tableau | Titre | Page |
|-----------|--|------|
| Tableau01 | Les codes des sous bassins versant de l'Oued Kebir-Rhumel | 11 |
| Tableau02 | Les sous bassins et leurs superficiels | 13 |
| Tableau03 | Périmètre des sous bassin de l'oued Rhumel-Boumerzoug | 13 |
| Tableau04 | L'indice de compacité de Gravelius des sous bassins de l'oued Rhumel-Boumerzoug | 14 |
| Tableau05 | Paramètres des longueurs et largeurs des sous bassins versants de l'oued Rhumel-Boumerzoug | 14 |
| Tableau06 | Les longueurs des talwegs | 18 |
| Tableau07 | Densité de drainage de l'oued Rhumel-Boumerzoug | 18 |
| Tableau08 | Densité de drainage permanente et temporaire de des sous bassins versants l'oued | 19 |
| Tableau09 | Les classent des altitudes dans le bassin | 21 |
| Tableau10 | Coordonnées de station utilisée | 28 |
| Tableau11 | Valeurs des coefficients de pluie pour la série de données météorologique | 30 |
| Tableau12 | Représentation d'année extrême humide et sèche | 32 |
| Tableau13 | Valeurs du coefficient de variation pour les stations pluviométriques | 33 |
| Tableau14 | Evapotranspiration potentiel ETP (mm) | 38 |
| Tableau15 | Coordonné Lambert de station pluviométrique utilisée | 41 |
| Tableau16 | La pluie maximale journalière P_{maxj} | 42 |
| Tableau17 | l'écart type et le coefficient de variations de la série d'observation | 43 |
| Tableau18 | valeurs de \bar{P}_{maxj} , C_v et b | 43 |
| Tableau19 | Les valeurs des pluies journalières maximales moyennes | 46 |
| Tableau20 | Les valeurs de coefficient de variation des pluies journalière maximales moyenne | 47 |
| Tableau21 | Les valeurs de l'exposant climatique des pluies journalières maximales moyennes | 47 |
| Tableau22 | Les données pluviographiques des sous bassin de la Rhumel-Boumerzoug | 47 |
| Tableau23 | valeur de Pluie journalière maximale fréquentielle | 48 |
| Tableau24 | Temps de concentration en estimé par différentes formules | 49 |
| Tableau25 | valeur de la pluie de courte durée d'après le temps de concentration de Giandotti | 50 |

| | | |
|------------------|---|-----------|
| Tableau26 | valeur de la pluie de courte durée d'après le temps de concentration de Sogreah | 50 |
| Tableau27 | valeur de la pluie de courte durée d'après le temps de concentration de Boutaoutaou | 50 |
| Tableau28 | Les valeurs de coefficient de l'écoulement | 51 |
| Tableau29 | Les valeurs de l'intensité de l'écoulement d'après la formule de Giandotti | 51 |
| Tableau30 | Les valeurs de l'intensité de l'écoulement d'après la formule de Sogreah | 52 |
| Tableau31 | Les valeurs de l'intensité de l'écoulement d'après la formule de Boutaoutaou | 52 |
| Tableau32 | le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Giandotti | 53 |
| Tableau33 | le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Sogreah | 53 |
| Tableau34 | le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Boutaoutaou | 53 |
| Tableau35 | Les valeurs des quantiles | 55 |
| Tableau36 | les valeurs des caractéristiques statistiques | 56 |
| Tableau37 | Estimation du coefficient d'asymétrie | 56 |
| Tableau38 | Valeurs des débits spécifiques maxima pour le sous bassin de l'oued. Smendou (code 10 06 01). | 56 |
| Tableau39 | valeur des débits spécifique maximale du bassin versant de la Smendou. | 57 |
| Tableau40 | récapitulation de débit maximum fréquentiel par les formules empirique | 59 |
| Tableau41 | récapitulation de débit maximum fréquentiel observé | 59 |
| Tableau42 | le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Sogreah | 61 |
| Tableau43 | l'écoulement fréquentiel d'après le temps de concentration de Sogreah | 62 |

Liste des figures

| Figure | Titre | page |
|-----------------|--|-----------|
| Figure01 | volume d'eau ruisselé au cours d'une averse en fonction du régime d'infiltration du sol | 3 |
| Figure02 | les deux mécanismes de formation du ruissellement de surfaces saturées. L'eau ruisselle à la fois par exfiltration et par contribution de la pluie | 4 |
| Figure03 | impact de l'urbanisation sur le débit et la vitesse du ruissellement | 5 |
| Figure04 | La situation du bassin versant du Kebir-Rhumel en Algérie | 10 |
| Figure05 | Le réseau hydrographique et sous bassin du Kebir-Rhumel | 11 |
| Figure06 | La situation de sous bassin d'Oued Rhumel-Boumerzoug en bassin de Kebir-Rhumel | 12 |
| Figure07 | les oueds Rhumel et Boumerzoug dans le bassin de Rhumel-Boumerzoug | 15 |
| Figure08 | Les langues des principaux oueds par sous bassin | 16 |
| Figure09 | Profil en long d'Oued Rhumel | 17 |
| Figure10 | Structure géologique de sous bassin de Rhumel-Boumerzoug | 25 |
| Figure11 | Les ensembles lithologiques de sous bassin de Rhumel-Boumerzoug | 27 |
| Figure12 | Variation annuelle des précipitations | 29 |
| Figure13 | Variation du coefficient pluviométrique au niveau de station pluviométrique | 31 |
| Figure14 | Variations des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain El Bey | 33 |
| Figure15 | Variations des précipitations moyennes saisonnières | 34 |
| Figure16 | Température moyennes annuelles 1990/2014 de station d'AIN El Bey | 35 |
| Figure17 | Diagramme thermique 1990/2014 de station d'Ain El Bey | 36 |
| Figure18 | Diagrammes pluvio-thermiques | 37 |
| Figure19 | Carte de station pluviométrique de la Rhumel-Boumerzoug | 41 |
| Figure20 | Carte de la pluie maximale moyenne journalière $\bar{P}_{\max j}$ du bassin versant de Rhumel-Boumerzoug | 44 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| Figure21 | Carte du coefficient de variation C_v des pluies maximales journalières du bassin versant de la Rhumel-Boumerzoug | 45 |
| Figure22 | Carte du coefficient climatique b des pluies maximales journalières du bassin versant de la Rhumel-Boumerzoug | 46 |
| Figure23 | Courbe empirique de l'oued Smendou (10.06.01) | 55 |
| Figure24 | ajustement par la loi du Gumbel de l'oued Smendou (10.06.01) | 58 |
| Figure25 | dépendance de : $bout, Gio, Sog=f(Alekseev)$ | 60 |
| Figure26 | dépendance de : $bout, Gio, Sog=f(Gumbel)$ | 61 |
| Figure27 | dépendance de : $bout, Gio, Sog=f(Gumbel)$ | 62 |
| Figure28 | dépendance de : $E1\%=f(s), r=0.14$ | 63 |
| Figure29 | dépendance de : $E1\%=f(Hm), r=0.24$ | 63 |
| Figure30 | Carte de $E1\%$ d'Oued Rhumel-Boumerzoug. | 64 |



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions (associer à une date une certaine grandeur) ou des prédéterminations (associer à une grandeur une certaine probabilité) de débits ou de volume en un point ou sur une surface.

L'écoulement est la partie des précipitations qui ne s'infiltrer pas dans le sol et ne s'évapore pas dans l'atmosphère. Dès lors que les capacités de rétention de la végétation et du sol superficiel sont saturées, cette partie s'écoule en surface avant d'atteindre le réseau hydrographique directement ou via un système artificiel d'évacuation.

Selon l'intensité de la pluie, l'eau peut, soit s'infiltrer dans le sol, soit s'accumuler et s'écouler sous forme de l'écoulement de surface. Si, l'intensité de l'averse est inférieur au taux d'infiltration, les pertes par évaporation et interception étant négligée toute l'eau de précipitation pénétrera dans le profil du sol .Par contre, une intensité d'averse supérieure au taux d'infiltration produira une série de phénomène qui finalement causeront du écoulement en surface. Ce dernier peut engendrer l'érosion des particules plus ou moins grosses en fonction de la quantité d'eau en mouvement et de la pente, ce qui peut avoir un effet abrasif sur le terrain. Il peut causer une perte en terre et en éléments nutritifs préjudiciables au niveau agronomique.

La conception de l'ouvrage hydraulique basée sur les hypothèses de calcul de l'écoulement car la généralisation des sols imperméabilisés (zone aménagée) diminue les infiltrations, ce qui peut conduire à des crues violentes et augmente les risques de saturation des collecteurs d'eau et d'inondation en aval. Le développement de l'industrie et de l'agriculture exige des ressources supplémentaires en eau, car chaque crue constitue un apport en eau indispensable pour la région dont la gestion rationnelle est conditionnée par la quantification de l'écoulement, la connaissance de sa genèse et des facteurs déterminants.

Ce travail s'articule autour du thème d'étude l'hydrologique sur un hydro-système situé dans la région de l'Est Algérien. Il s'agit du bassin versant de l'Oued El Rhumel-Boumerzoug qui est inscrit dans la série des grands bassins constantinois qui déversent leurs flux dans la mer méditerranéenne et participe d'une façon importante à l'alimentation du barrage de Beni Haroun situé à la wilaya de Mila.

Notre objet est la détermination des différentes étapes d'estimation de l'écoulement pluvial d'oued el Rhumel-Boumerzoug.



CHAPITRE I
RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'écoulement ou le ruissellement superficiel se définit comme le phénomène de drainage des eaux pluviales au niveau de la surface du bassin versant. Les écoulements constituent donc le facteur essentiel pour l'alimentation des cours d'eau.

L'analyse des observations hydrométriques au niveau des cours d'eau donne une idée précise sur le comportement hydrologique de ces derniers ainsi que sur le processus d'interférence des facteurs physico-géographiques .

I.1.Genèse et transfert du ruissellement

Le partage des précipitations en surface du sol se fait en plusieurs composantes : interception par la végétation, évapotranspiration, infiltration dans le sol, ruissellement en surface. Sur les parcelles agricoles en saison hivernale, l'interception par la végétation et l'évapotranspiration est considérée comme négligeable. L'eau ruisselée est donc celle qui n'a pas pu s'infiltrer dans le sol. [6]

I.2. Mécanismes de formation du ruissellement de surface

On distingue trois mécanismes principaux :

- ✚ Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration.
- ✚ Ruissellement de surfaces saturées.
- ✚ Ruissellement de surfaces imperméables.

I.2.1. Ruissellement par dépassement de la capacité d'infiltration

Ce modèle d'explication est sans doute le plus connu et le plus utilisé en hydrologie. Il démontre qu'un mince filet d'eau se forme à la surface du sol lorsque l'intensité de la précipitation est supérieure à la capacité d'infiltration . Il se base sur le principe d'une capacité d'infiltration décroissante du sol avec le temps . L'humidité des sols a donc ici une grande influence sur le début du processus. L'évaluation des conditions d'antécédence d'humidité du sol est donc importante, car elle permet d'évaluer le temps de submersion (temps entre le début de l'averse et l'amorce du ruissellement).

Ce dernier est ainsi plus court si le sol est humide et si l'intensité de la pluie est forte. Par conséquent, tant que l'intensité d'une averse ne dépasse pas la capacité d'absorption du sol, l'eau pénètre en profondeur. Par contre, lorsque l'intensité dépasse cette capacité d'absorption, l'excédent d'eau s'accumule en surface et un mince filet d'eau se forme. C'est le ruissellement hortonien. Le volume d'eau écoulé est alors égal à la pluie nette, voire figure 1.

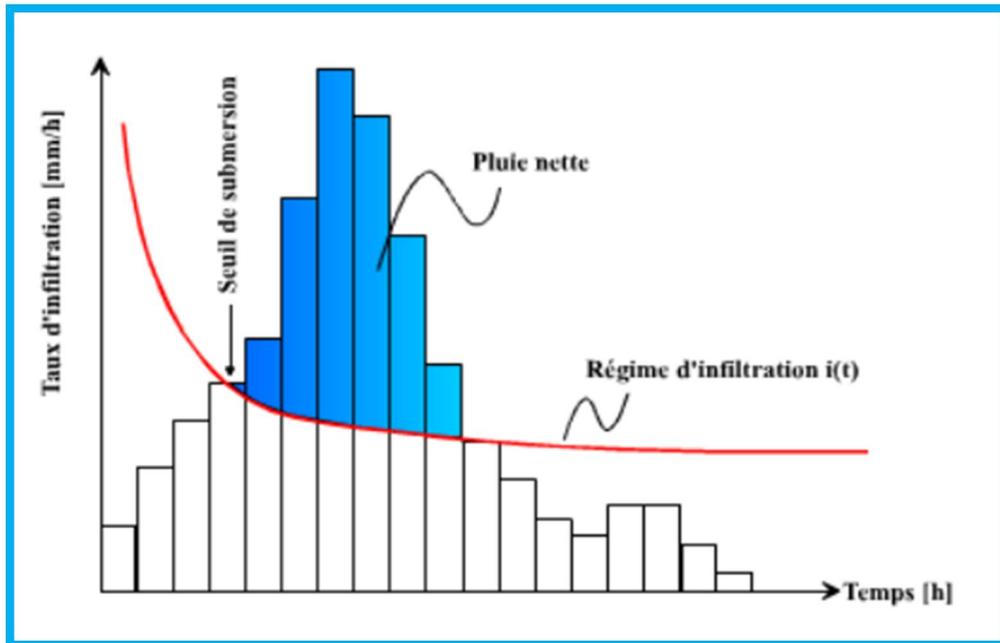


Figure1 : volume d'eau ruisselé au cours d'une averse en fonction du régime d'infiltration du sol. L'axe y représente à la fois l'intensité de la pluie et la capacité d'absorption [mm/h]. [7]

Le ruissellement hortonien se rencontre principalement dans les régions semi-arides ou méditerranéennes, car les sols de ces régions possèdent souvent une faible capacité d'infiltration. En effet, ils sont souvent compactés ou recouverts d'une croûte avec peu de végétation. Des pluies de forte intensité peuvent alors provoquer un ruissellement très important qui peut atteindre 80% des précipitations dans certaines régions méditerranéennes. Cependant, dans les régions tempérées, l'intensité des précipitations peut parfois aussi être supérieure à la capacité d'infiltration des sols, quand bien même ces derniers ont des taux élevés d'absorption. C'est le cas en été lors d'intenses averses orageuses.

1.2.2. Ruissellement de surfaces saturées

Ce type de ruissellement se rencontre sous les climats tempérés et humides où les sols végétalisés ont souvent de bonnes capacités d'infiltration. Il est provoqué par une saturation des horizons supérieurs du sol et survient principalement dans les zones hydromorphes où la nappe est proche de la surface (nappe perchée, nappe temporaire affleurant). Dans un premier temps, les précipitations abondantes diminuent la capacité d'infiltration des sols et engendrent une remontée du niveau de la nappe. Cette saturation par le bas produit alors un ruissellement de surface saturée. L'écoulement se produit à la fois par l'exfiltration de la nappe et par les précipitations qui tombent sur le sol saturé voire figure 2.

Dans un deuxième temps, le filet d'eau peut s'infiltrer dans des zones non saturées plus en aval ou alors directement rejoindre un cours d'eau. S'il participe à

l'écoulement d'une rivière ce type de ruissellement est appelé ruissellement de surfaces contributives.

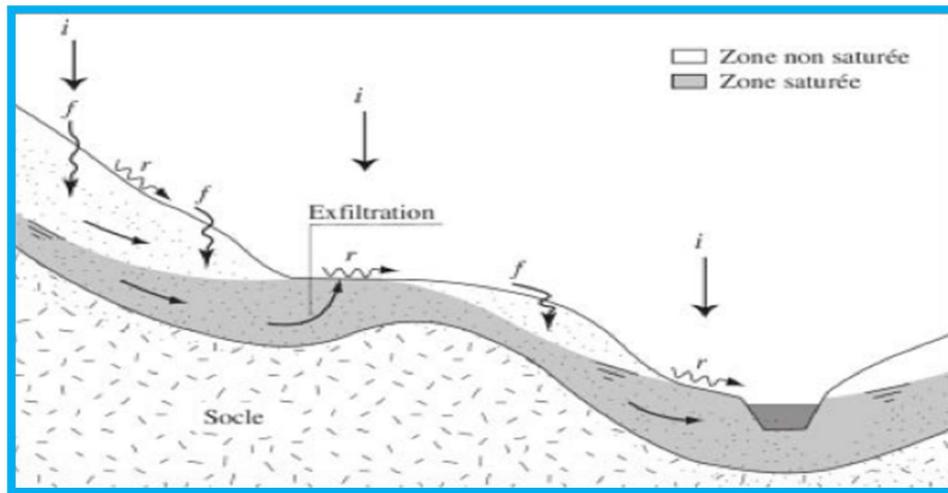


Figure2 : les deux mécanismes de formation du ruissellement de surfaces saturées.
L'eau ruisselle à la fois par exfiltration et par contribution de la pluie. [7]

Sous les climats tempérés, les deux types de ruissellement présentés ci-dessus peuvent se produire à certaines périodes de l'année. En été, c'est principalement le ruissellement hortonien qui survient car le sol est sec et l'intensité des pluies dépasse souvent la capacité d'infiltration. Lors des périodes de précipitations abondantes par contre, il se produit un ruissellement de surfaces saturées car les sols humides ne peuvent plus stocker d'eau.

1.2.3. Ruissellement de surfaces imperméables

L'urbanisation impacte fortement la capacité d'infiltration naturelle des sols. En effet, les surfaces imperméables augmentent incontestablement le débit d'eaux ruisselées et la vitesse de l'écoulement. Le débit de point est ainsi atteint plus rapidement, son amplitude est plus forte et le volume d'eau total est plus important voire figure 3. Par conséquent, le risque de pertes humaines ou dégâts matériels s'accroît également à mesure que l'urbanisation progresse, si des mesures de protection ne sont pas prises. [7]

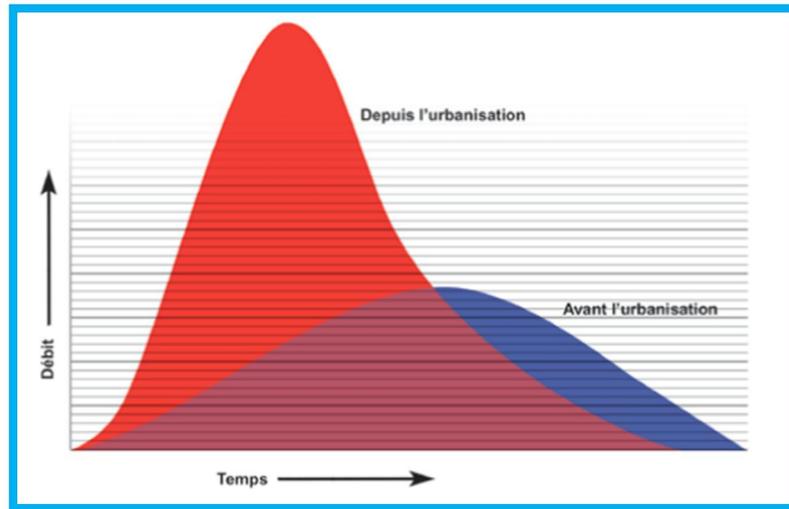


Figure3 : impact de l'urbanisation sur le débit et la vitesse du ruissellement. [7]

Le coefficient de ruissellement R est utilisé pour évaluer le degré d'imperméabilisation d'une surface et pour calculer les débits ruisselés. Il exprime « la fraction de la pluie qui ruisselle sur une surface donnée ». Sa valeur varie entre 0 et 1. Elle dépend du type de la surface, de la pente du terrain, de l'intensité de la pluie, du taux de saturation du sol et des éventuelles zones de stockage.

Ensuite, il faut savoir que le ruissellement urbain ne provient pas toujours du ruissellement en surface. En effet, lors d'intenses précipitations de courte durée, les systèmes d'évacuation peuvent être rapidement saturés car le 80 % de l'eau de pluie des surfaces imperméables va dans les canalisations.

Pour des événements avec des temps de retour supérieurs le système est donc surchargé, ce qui provoque des débordements. Le système ne jouant plus son rôle, l'eau ruisselle en surface. Des inondations de caves et de rues sont alors possibles. De plus, le déversement des eaux usées dans les eaux superficielles provoque une pollution des écosystèmes et menace la santé des personnes. [7]

I.3. Les procédures et les formules d'estimation de débit

Puisque les écoulements varient en fonction du temps, il serait intéressant d'avoir des relevés instantanés de jaugeage en un point donné et en un temps déterminé pour pouvoir suivre l'évolution des débit durant toute une période bien déterminée.

Pour estimer le débit des eaux pluviales, les procédures sont les suivantes :

- ✚ Division du lotissement en des sous-bassins versants indépendants caractérisés chacun d'eux par une pente, une superficie et un coefficient de ruissellement qui dépend de la couverture et de la nature du terrain naturel du Bassin.
- ✚ Calcul des caractéristiques principales de chaque bassin versant :
 - ✓ La superficie

- ✓ La pente : est calculée suivant la ligne de la plus grande pente
- ✓ Le coefficient de ruissellement
- ✚ Calcul du débit de chaque bassin versant en utilisant les différentes formules dont celle de Caquot reste la plus cohérente et la plus fiable.
- ✚ Assemblage des sous Bassins versant afin d'évaluer le débit à l'exutoire.

Il y a plusieurs formules d'estimer le débit, on distingue :

I.3.1.Méthode rationnelle

Cette méthode est la plus ancienne, elle utilise un modèle simple de transformation de la pluie (décrite par son intensité I), supposée uniforme et constante dans le temps, en un débit instantané maximal à l'exutoire. Celui-ci est atteint lorsque l'ensemble du bassin contribue à la formation du débit, donc lorsque la durée de l'averse est égale au temps de concentration du bassin versant. En bref, et par simplification.

La méthode rationnelle suppose que la durée de la pluie est égale au temps de concentration. Elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité de la pluviométrie.

➤ **Formule de calcul de débit :**

La relation de la méthode rationnelle est :

$$Q = CiA \quad [11]$$

Avec :

Q : débit maximal de l'hydrogramme (débit de pointe Q_p se rapportant à une fréquence F) en m^3/s .

A : surface du bassin versant en hectares (ha).

i : intensité moyenne de la pluie de fréquence F en mm/h pendant le temps de concentration T_c .

C : coefficient de ruissellement.

I.3.2. Méthode superficielle

La méthode superficielle consiste à établir la continuité de l'écoulement entre deux sections, la première étant une surface horizontale recevant de la précipitation et la seconde étant l'exutoire du bassin versant où l'écoulement se concentre.

➤ **Formule de calcul de débit :**

$$Q = \frac{\alpha}{6(\beta+\delta)} \times C \times i \times A \quad [11]$$

Avec :

i : Intensité moyenne en mm/min de durée t_c ($i = H/t_c$).

A : Superficie du bassin en (ha),

C : Coefficient de ruissèlement,

$\beta+\delta$: Effet de capacité totale (β correspondant à l'écoulement et δ au stockage), égal à 1.1 il est souhaitable de la prendre égal à 1.4 ($\beta=0.6$ et $\delta=0.8$) dans le cas de secteurs importants= 100 à 150 ha, α : Égal à $4^{-\varepsilon}$ avec $\varepsilon= 0,05$ valeur moyenne ($0.01 \leq \varepsilon \leq 0.1$).

➤ **Formule de calcul de l'intensité pluvieuse :**

Plusieurs formules permettent de calculer l'intensité pluvieuse de fréquence de durée donnée : Montana, Montmarin, Grisollet, Talbot, etc. Nous n'utiliserons que la formule de Montana largement utilisée au Maroc. Les autres formules ne seront pas utilisées car elles ont été déduites d'observations faites dans des pays autres que le Maroc.

La formule de Montana s'écrit comme suit :

$$I = a \times t^b \quad [11]$$

Avec :

I : Intensité moyenne maximale de la pluie sur une durée t de référence,

a et **b** : coefficients d'ajustement.

I.4. Temps de concentration

Le temps de concentration **TC** des eaux sur un bassin versant se définit comme le maximum de durée nécessaire à une goutte d'eau pour parcourir le chemin hydrologique entre un point le plus long du bassin et l'exutoire de ce dernier. Le temps de concentration intervient pour l'étude des crues, et sert aussi à la comparaison des bassins entre eux. [2]

Pour évaluer ce paramètre, nous avons adopté plusieurs formules :

I.4.1. Formule de Giandotti

Cette formule empirique est développée pour les cours d'eau d'Italie, elle est exprimée comme suit :

$$T_C = \frac{4 \times \sqrt{S} + 1,5 L_{WP}}{0,8 \times \sqrt{H}} \quad [6]$$

Avec :

T_C: Temps de concentration,

L_{WP}: Longueur du talweg principal (km),

S : superficie du bassin km²,

H: $H_{moy} - H_{min}$ (m).

I.4.2. Formule de Sogreah

Cette formule a été développée par Sogreah, elle est recommandée pour les petits bassins versants de l'Algérie, s'écrit (Documentation ANRH) :

$$T_C = 3 \times \left(\frac{L_{WP} \times S}{3} \right)^{1/4} \frac{1}{(10 \times i)^2} \quad [6]$$

Avec :

T_C : Temps de concentration en heure,

S : Superficie du bassin versant en km²,

L_{WP} : Longueur du talweg principal en km,

i : Pente du talweg principal en %.

I.4.3. Formule de Goptchenko

La formule de Goptchenko est développée pour la région steppique de l'Ukraine, analogue aux plateaux (Goptchenko et, al, 1989) (Goptchenko et, al, 2002).

$$T_C = \frac{L_{WP}}{S^{0,14} \times I^{0,33} \times 1,19} \quad [6]$$

Avec :

L_{WP} : La longueur du cours d'eau principal exprimée en km,

S : La superficie du bassin versant en km²,

I : La pente moyenne du talweg principal en ‰.

I.4.4. La méthode de Kirpich

$$T_C = 32,5 \times 10^{-5} \times L^{0,77} \times I^{-0,385} \quad [12]$$

Avec :

L_{WP} : La longueur du cours d'eau principal exprimée en km,

I : La pente moyenne du talweg principal, en ‰.

I.4.5. La méthode de Boutaoutaou

Pour les conditions physiographiques des bassins versant de l'Algérie, la formule de temps de concentration proposée est la suivante :

$$T_C = 1,7 \times \left(\frac{S \times L}{\sqrt{I}} \right)^{0,19} \quad [4]$$

Avec :

T_C : Temps de concentration en heurs,

S : Surfaces en Km²,

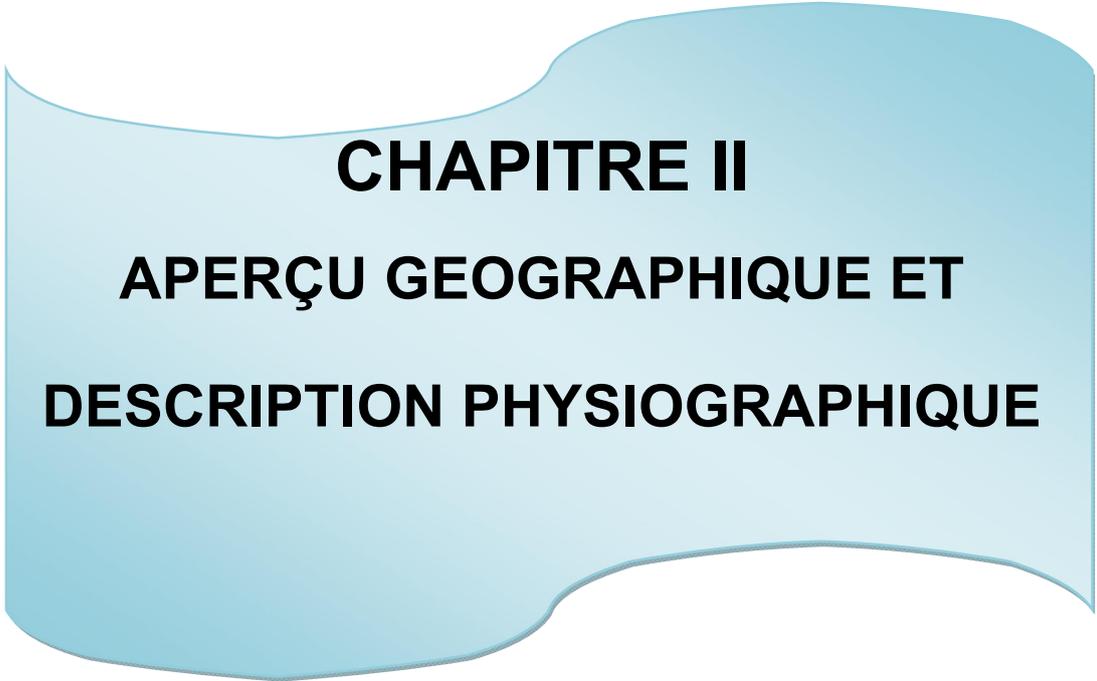
L : la longueur du cours d'eau en Km,

I : Pente de cours d'eau en %.

Conclusion

La recherche bibliographique qui a fait l'objet d'une synthèse des processus prépondérant de genèse de l'écoulement. Dans ce contexte on a intéressé par l'hypothèse de Horton , cette dernière basée essentiellement sur la combinaison entre l'état de saturation de sol et l'intensité de la pluie totale, qui nous a permis de calculer la quantité de la pluie nette soit analytiquement ou graphiquement à partir de la forme de l'hytogramme de pluie totale et la capacité d'infiltration du sol dans un pas de temps.

On a mentionné aussi quelques formules les plus fréquemment utilisées pour le calcul de temps de concentration et par la suite de débit maximum des eaux pluviales.



CHAPITRE II
APERÇU GEOGRAPHIQUE ET
DESCRIPTION PHYSIOGRAPHIQUE

Introduction

Ce chapitre consacré à la présentation de sous bassin de Rhumel-Boumerzoug : l'aperçu géographique et la description physiographique (relief, les grandes ensemble géologique et la capacité de perméabilité des formations lithologique) de la zone d'étude.

II.1. Aperçu géographique

II.1.1. Le bassin versant de Kebir el Rhumel

Situé au Nord Est Algérien, ce bassin représente environ Soit 20% du territoire du grand bassin constantinois-Seybouse-Mellegue. Avec une superficie de 8815 Km² et englobe dans sa surface plusieurs villes et agglomérations ,on distingue comme principales : Constantine, Mila, EL Khroub ,Ain Mila, Chelghoum el Aid ,Ain Fakroune, El Milia, Hamma Bouziane et Tadjananet .[1] Ce dernier possède une façade maritime d'environ 7 km, Il est centré 36° de latitude Nord, de 7° de longitude Est . [8]

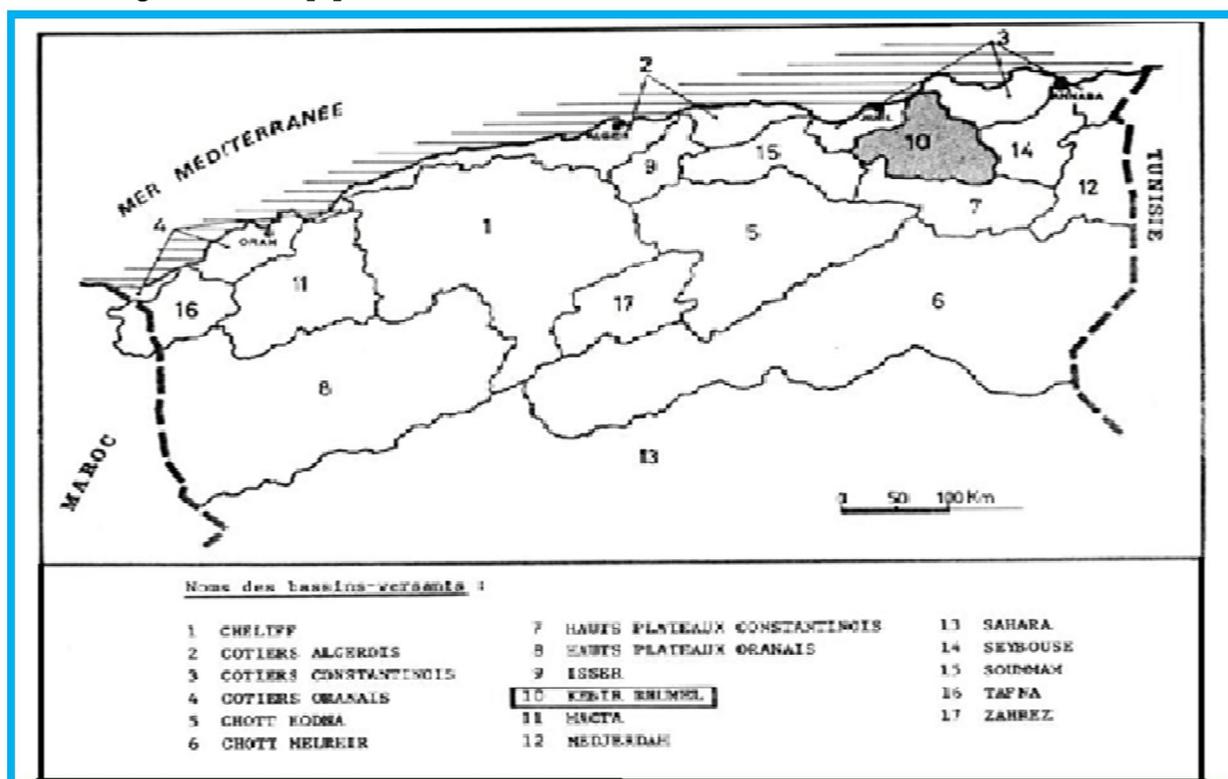


Figure 4 : La situation du bassin versant du Kebir-Rhumel en Algérie.

Le bassin de Kebir-Rhumel présente un chevelu hydrographique très dense totalisant plus de 4200 km. Quarante-trois oueds ont une longueur supérieure à 10 km. Ce bassin de Kebir-Rhumel est constitué de plusieurs oueds : Oued El Rhumel, Endja, El Kebir et Boumerzoug sont les principaux cours d'eau du bassin.

Selon le cahier d'ABH (Agence de Bassin Hydrographique) le bassin du Kebir-Rhumel est codifié par le code 10 est subdivisé en sept sous-bassins versants.

Tableau1: Les codes des sous bassins versant de l'Oued Kebir-Rhumel.

| Code du sous bassin | Noms du sous bassin |
|---------------------|---------------------------|
| 10 01 | Oued Dehamcha-Kebir Amont |
| 10 02 | Kebir Amont-Endja |
| 10 03 | Kebir Amont |
| 10 04 | Rhumel-Seguen |
| 10 05 | Boumerzoug |
| 10 06 | Rhumel-Smendou |
| 10 07 | Kebir –Martime |

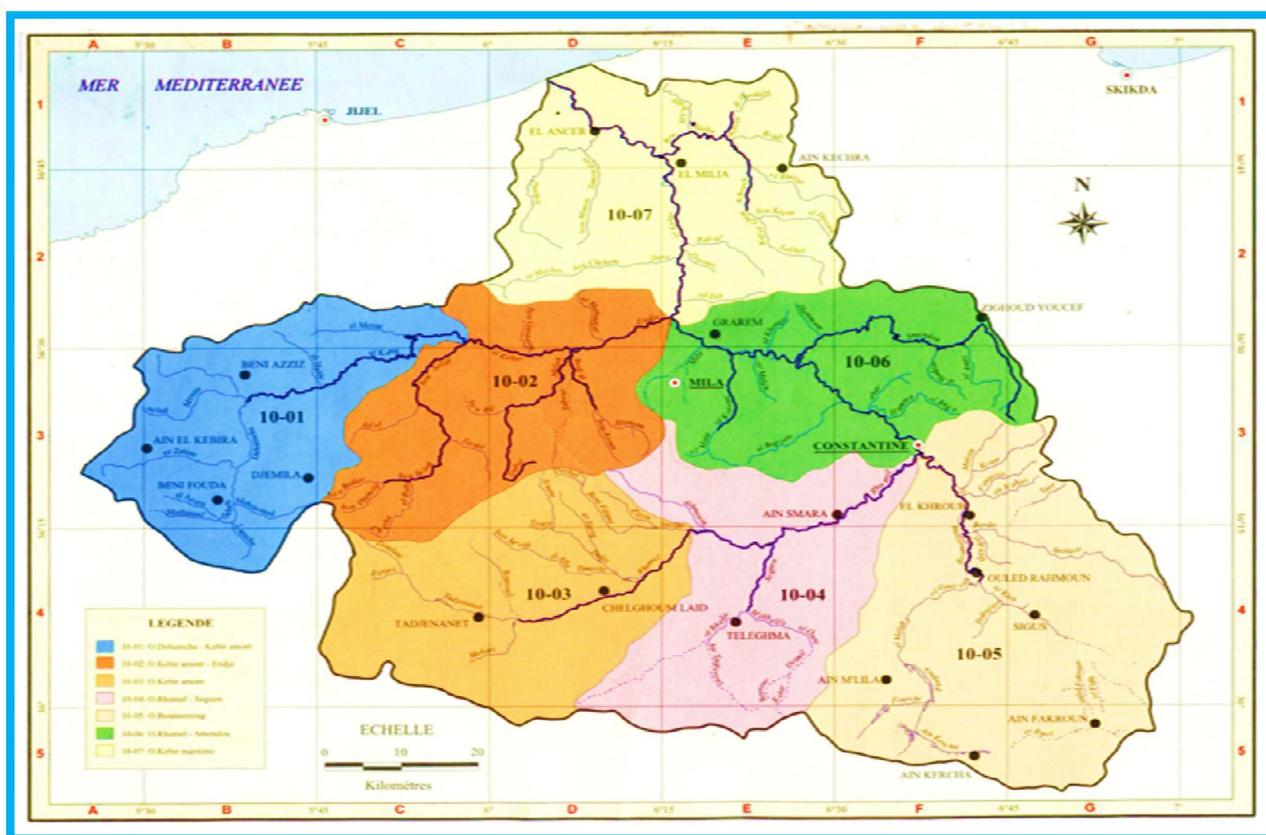


Figure 5 : Le réseau hydrographique et sous bassin du Kebir-Rhumel. [3]

Le bassin de Kebir-Rhumel compte :

- ❖ Trois barrages : Beni Haroun, Hammam Grouz et Berla.
- ❖ Trente-trois retenues collinaires en majorité envasées. [3]

II.1.2. Le sous bassin de Rhumel-Boumerzoug

Le sous bassin de Rhumel-Boumerzoug est situé en grande partie sur le versant méridional du bombement tellien. Il représente à ce titre une zone intermédiaire entre le domaine tellien à très forte influence méditerranéenne au nord et le domaine des hautes plaines à forte influence continentale au sud.

Il couvre une superficie de 5328 km², soit plus 60% de la superficie totale du grand bassin Kebir-Rhumel dont il fait partie. Il est limité naturellement par :

- ✚ Au Nord-Ouest et Est le bassin des côtières Constantinois Est et Centre.
- ✚ Au Sud, le bassin des hauts plateaux constantinois.
- ✚ A l'Ouest les bassins de l'Algérois- Hodna- Soummam.
- ✚ A l'Est le bassin de la Seybouse.

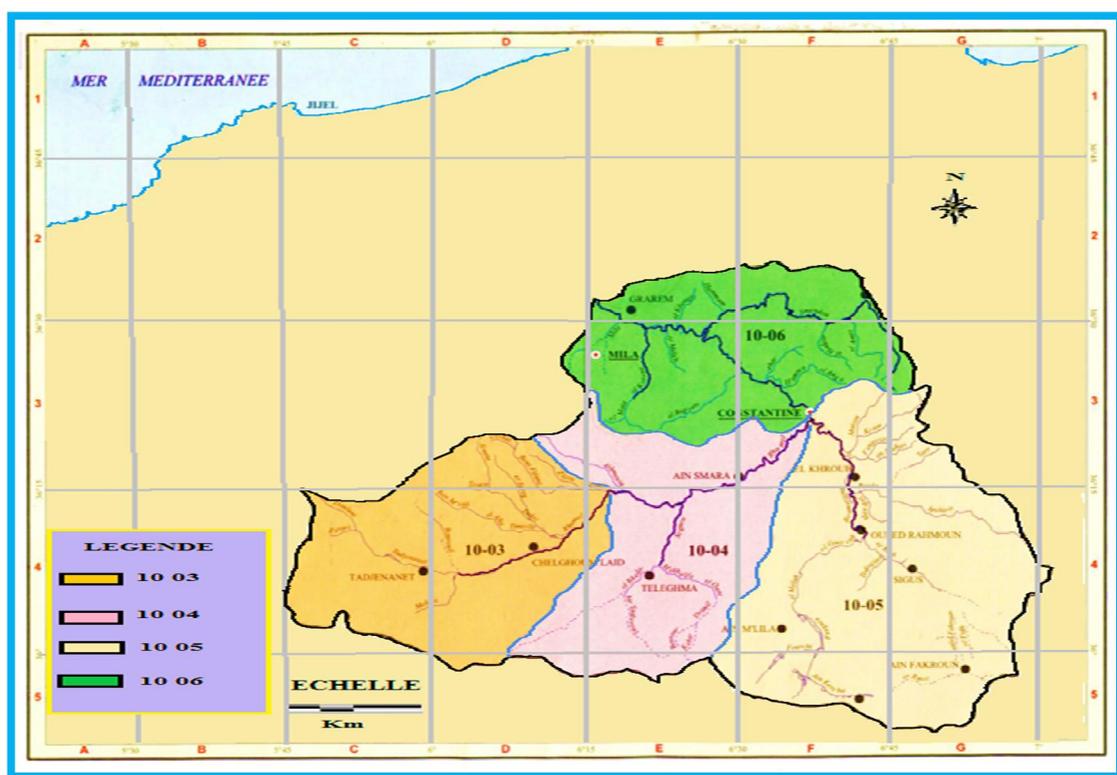


Figure 6 : La situation de sous bassin d'Oued Rhumel-Boumerzoug en bassin de Kebir-Rhumel.

Administrativement, le bassin couvre quatre (04) wilayas : Constantine en sa quasi-totalité, Mila, Sétif et Oum El Bouaghi partiellement. Ces quatre wilayas constituant le bassin, contiennent quarante-trois (43) communes.

Le site de drainage principal du bassin comprend par Oued Rhumel et ses affluents et Oued Boumerzoug et ses affluents. Les deux oueds se convergent à la ville de Constantine pour former de nouveau Oued Rhumel qui se jette dans le barrage de Beni Haroun. [5]

II.2. Description physiographique

II.2.1. Les caractéristiques morphométriques du bassin versant de l'oued Rhumel –Boumerzoug :

II.2.1.1.La superficie

La superficie d'un bassin versant est la plus importante des caractéristiques. La superficie planimétrie de notre bassin d'étude est de l'ordre de 5328 km². Cette entité hydrographique est composée de quatre (04) sous bassins versant.

Tableau 2: Sous bassins et leurs superficiels.

| Sous bassin | Surfaces (km ²) |
|----------------|-----------------------------|
| Rhumel Amont | 1217 |
| Rhumel-Seguen | 1162 |
| Boumerzoug | 1868 |
| Rhumel-Smendou | 1081 |
| Bassin | 5328 |

II.2.1.2 Le périmètre

Les périmètres des sous bassins de l'oued Rhumel-Boumerzoug curvimètres figurent dans le tableau ci-dessous. Le périmètre de notre bassin d'étude est de l'ordre de P = 404.8 Km.

Tableau3 : Périmètre des sous bassin de l'oued Rhumel-Boumerzoug.

| Sous bassin | P (Km) |
|----------------|--------------|
| Rhumel Amont | 162,5 |
| Rhumel-Seguen | 200,7 |
| Boumerzoug | 217,9 |
| Rhumel-Smendou | 170,1 |
| Bassin | 404,8 |

II.2.1.3.La forme

La forme d'un bassin versant influence les débits écoulés sur le bassin versant. Pour cela on utilise l'indice de compacité de Gravelius (1914) K_C , défini par la formule suivante :

$$K_C = 0,28P/\sqrt{S} \quad [9]$$

Avec :

K_C : est l'indice de compacité de Gravelius,

P : périmètre du bassin km,
S : surface du bassin versant km².

Tableau4 : L'indice de compacité de Gravelius des sous bassins de l'oued Rhumel-Boumerzoug.

| Sous bassin | K _C |
|----------------|----------------|
| Rhumel Amont | 1,3 |
| Rhumel-Seguen | 1,65 |
| Boumerzoug | 1,41 |
| Rhumel-Smendou | 1,45 |
| Bassin | 1,55 |

Pour la totalité des sous bassins, l'indice de compacité K_C est égal à 1,55. On peut dire que le bassin versant de l'oued Rhumel-Boumerzoug se caractérise par une forme allongée.

II.2.1.4. La notion de rectangle équivalent

La notion de rectangle équivalent introduite par M. Roche (1962) correspond à une transformation purement géométrique dans laquelle on assimile le bassin à un rectangle ayant le même périmètre et la même superficie, de cette façon les courbes de niveaux deviennent parallèles au petit côté du rectangle, et l'exutoire un petit côté du rectangle et comme ça on pourra comprendre le comportement hydrologique du bassin alors :

$$\bullet \quad L = \frac{K_C \times \sqrt{S}}{1,12 \times (1 + \sqrt{1 - (1,12/K_C)^2}} \quad [9]$$

$$\bullet \quad l = \frac{K_C \times \sqrt{S}}{1,12 \times (1 - \sqrt{1 - (1,12/K_C)^2}} \quad [9]$$

Avec :

- L* : Longueur du rectangle équivalent Km,
- l* : Largeur du rectangle équivalent Km,
- K_C* : est l'indice de compacité de Gravelius,
- S* : Surface du bassin versant Km².

Tableau5 : Paramètres des longueurs et largeurs des sous bassins versants de l'oued Rhumel-Boumerzoug.

| Sous bassin | L (Km) | l (Km) |
|---------------|--------|--------|
| Rhumel Amont | 61,44 | 19,81 |
| Rhumel-Seguen | 86,99 | 13,36 |
| Boumerzoug | 87,63 | 21,32 |

| | | |
|---------------------|--------------|-------------|
| Rhumel-Smendou | 69,5 | 15,56 |
| Total bassin | 171,3 | 31,1 |

II.2.2.les caractéristiques hydrographiques du bassin versant de l'oued Rhumel-Boumerzoug :

II.2.2.1.Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels permanents ou temporaires, par lesquels s'écoulent toutes les eaux de ruissellement et converge vers un seul point de vidange du bassin versant (exutoire).

Le bassin de Rhumel-Boumerzoug résulte de la jonction de deux cours d'eaux importants : les oueds Rhumel et Boumerzoug. Ils drainent une superficie de 5328 km² (Figure 7). [9]



Figure 7 : les oueds Rhumel et Boumerzoug dans le bassin de Rhumel-Boumerzoug.

Ces deux cours d'eaux prennent naissance du tell méridional, traversant les hautes plaines Constantinoises, avec une orientation Sud-Ouest–Nord-Est pour l'Oued Rhumel, et Sud-Est – Nord-Ouest pour l'Oued Boumerzoug. Ils s'encaissent rapidement dans les gorges calcaires de la ville de Constantine, constituant ainsi la partie supérieure du grand bassin du Kebir Rhumel. [5]

Le graphe ci-contre représente les oueds dont la longueur dépasse 10 km de bassin de Rhumel -Boumerzoug.

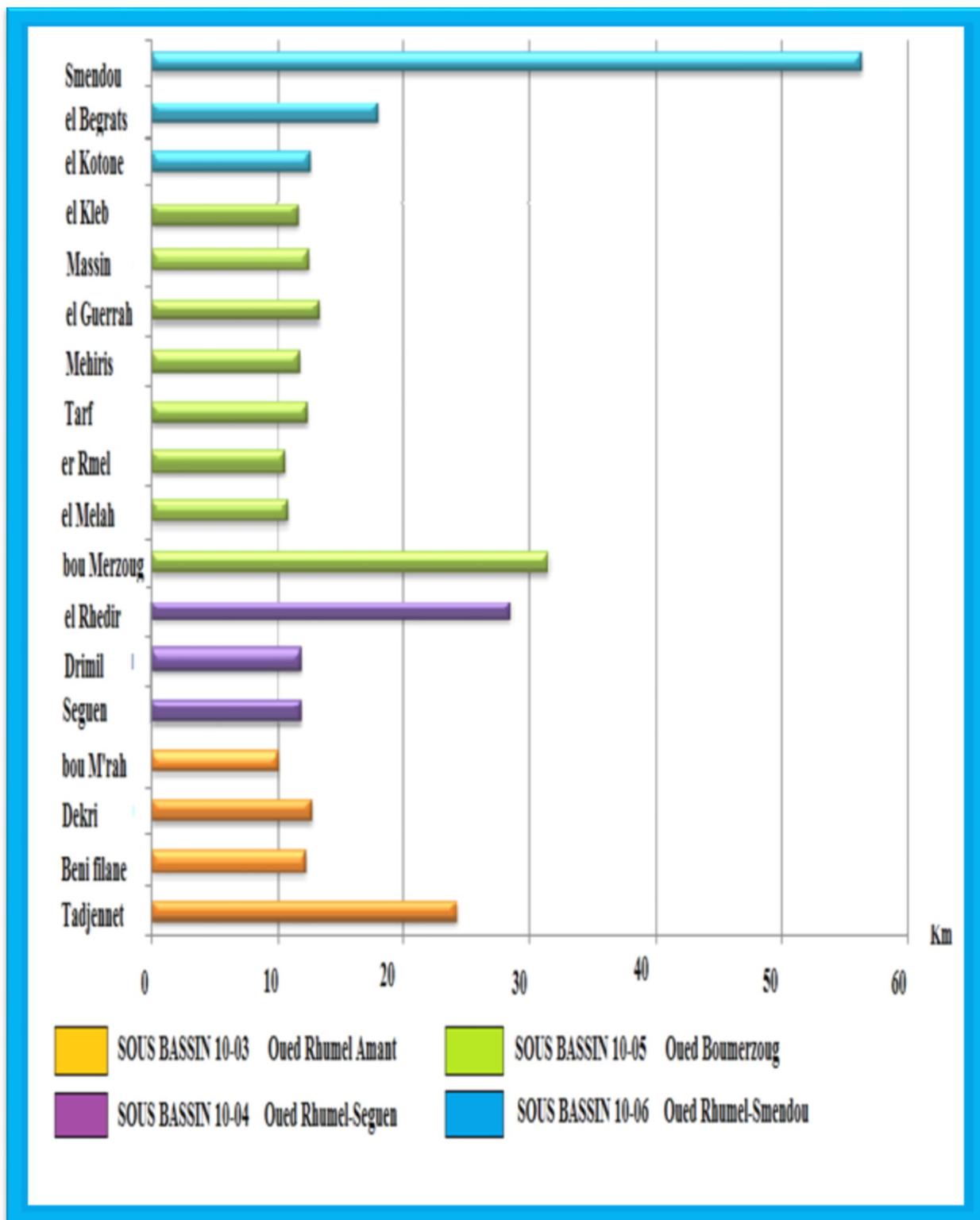


Figure8 : Les longueurs des principaux oueds par sous bassin.

L'examen du profil en long (Figure9), relatif au cours d'eaux principaux du bassin versant de Beni Haroun, c'est-à-dire Oued Rhumel et ses cinq (05) principaux affluents : Oued Seguen, Oued Boumerzoug, Oued Smendou, Oued Bagrat et Oued El Kotone, montre une série de rupture de pentes que l'on ne peut expliquer autrement

que par des résistances lithologiques à l'érosion. La plus importante de ces ruptures, apparaît au niveau du gorge de Constantine, cette zone a un matériel résistant est profondément entaillée par Oued el Rhumel.

De manière générale, de l'amont à partir de la source, l'Oued Rhumel, prend une forme convexe. Paradoxalement, après la grande rupture de pente que marque l'Oued Rhumel au rocher de Constantine, le cours d'eau prend une pente plus faible. Les gorges encaissées qui Renforcent la vitesse des eaux, peuvent parfois être l'origine de catastrophes dans le bassin. D'ailleurs, ces zones ont souvent connues les inondations les plus importantes, lors des fortes pluies, ou le cours d'eaux déborde de son lit principal, pour inonder les habitations situées dans la plaine alluviale.

A l'aval de l'Oued Rhumel, les affluents de Smendou, Bagrat et El Kotone, montrent un profil en long en courbes à fortes pentes. Les débits ici sont les plus importants, du l'accroissement rapides des vitesses d'écoulements, et du cumul hydrologique des affluents venant des massifs montagneux. Les écoulements, souvent à caractère torrentiel, peuvent avoir des conséquences dévastatrices. En effet, les eaux venant de l'amont du bassin et des affluents des versants Est et Ouest de la vallée du Rhumel s'accumulent, et une fois renforcé par ces fortes pentes elles deviennent importantes et fréquentes. [5]

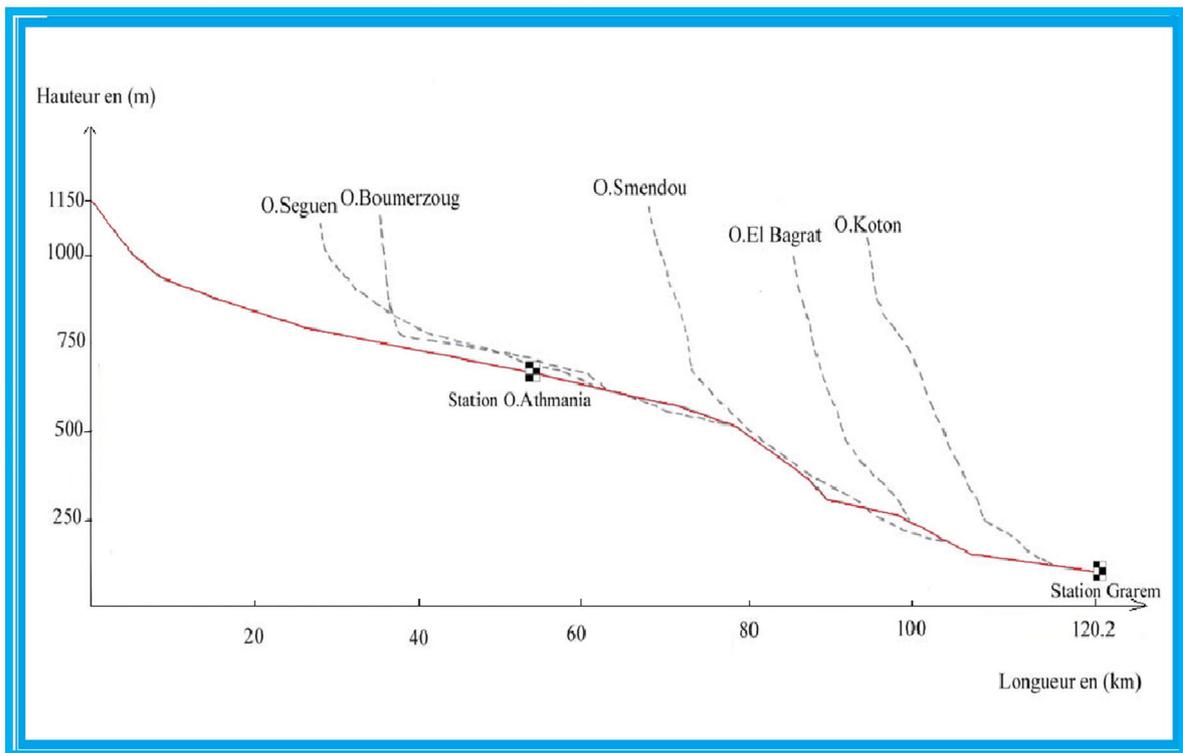


Figure 9 : Profil en long d'Oued Rhumel.

II.2.2.2. Longueurs des talwegs

Les longueurs des talwegs des sous bassins de l'oued Rhumel-Boumerzoug figurent dans le tableau ci-dessous.

Tableau6 : Les longueurs des talwegs.

| Sous bassin | L (Km) | L_p (Km) | L_t (Km) |
|---------------------|--------------|---------------|---------------|
| Rhumel Amont | 58,93 | 322,6 | 430,2 |
| Rhumel-Seguen | 53,8 | 312,8 | 511,1 |
| Boumerzoug | 81,1 | 534,3 | 724,7 |
| Rhumel-Smendou | 81,74 | 649,2 | 263,6 |
| Total bassin | 161,1 | 1818,9 | 1929,6 |

Avec :

L : longueur total des cours d'eau en km,

L_p : Longueur des talwegs permanents en km,

L_t : Longueur des talwegs temporaires en km.

II.2.Densité de drainage

Elle se définit comme étant le rapport de la longueur totale des cours d'eau à la surface du bassin versant. Elle est aussi la somme des densités de drainage temporaire et permanente.

$$D_d = L/S \quad [9]$$

Avec :

D_d : Densité de drainage (Km/Km²),

L : longueur total des cours d'eau (Km),

S : superficie du bassin versant (Km²).

Tableau7 : Densité de drainage de l'oued Rhumel-Boumerzoug.

| Sous bassin | Dd (Km/Km2) |
|---------------------|-------------|
| Rhumel Amont | 0,62 |
| Rhumel-Seguen | 0,71 |
| Boumerzoug | 0,67 |
| Rhumel-Smendou | 0,84 |
| Total bassin | 0,7 |

On peut calculer la densité de drainage permanente et la densité de drainage temporaire par les formules suivantes :

- $D_{dp} = L_p/S \quad [9]$

- $D_{dt} = L_t/S$

Avec :

D_{dp} : Densité de drainage permanente,

D_{dt} : Densité de drainage temporaire,

L_p : Longueur des talwegs permanents,

L_t : Longueur des talwegs temporaires.

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau8 : Densité de drainage permanente et temporaire des sous bassins versants de l'oued.

| Sous Bassin | D_{dp} (km/km) | D_{dt} (km/km ²) |
|---------------------|------------------|--------------------------------|
| Rhumel Amont | 0,27 | 0,35 |
| Rhumel-Seguen | 0,27 | 0,44 |
| Boumerzoug | 0,29 | 0,39 |
| Rhumel-Smendou | 0,6 | 0,24 |
| Total bassin | 0,34 | 0,36 |

La densité de drainage temporaire est élevée dans tous les sous bassins. Elle varie de 0,35 à 0,44. La situation est inversée en aval du bassin. Le sous bassin Rhumel - Smendou (10-06), la densité de drainage permanente est de 0,60 Km/Km² alors que la temporaire atteint l'ordre de 0,24 Km/Km².

Ainsi, le bassin de Rhumel-Boumerzoug appartient bien à deux grands domaines hydro climatiques différents. Un écoulement faible à moyen et temporaire, liée à une lithologie perméable et à pluviométrie faible, s'oppose des densités de drainage permanentes, élevées dans la partie Nord du bassin traduisant l'abondance pluviométrique, une perméabilité généralement faible. [5]

II.3.Le Relief

II.3.1. Les grands ensembles du relief

Le bassin versant de Beni Haroun est constitué d'un relief compartimenté. Au nord, l'épine dorsale du tell oriental, un ensemble de sommets alignés d'ouest en est appelé « chaîne numidique ». Au sud, les hautes plaines à forte influence continentale, dévoilant chacune des caractères et des problèmes géomorphologiques propres.

Du Nord au sud on peut distinguer les unités suivantes :

II.3.1.1.Le versant nord de la chaîne numidique

La chaîne numidique par son versant nord représente les limites supérieures du bassin, Séparant les hautes plaines au sud du bassin et les plaines côtières. De direction ouest-est, elle est composée d'une suite de massifs à altitudes modestes : djebel Sidi Driss est le point culminant dans le bassin atteint 1364 m. Décroît chaque fois qu'on se dirige vers l'est.

Cette chaîne jouant le rôle de ligne de partage des eaux, descend vers les hautes plaines, où par endroits elle est relayée par des massifs culminants vers 1300m à 1400m. C'est le cas de djebels Chettaba (1316m) et Ouahch (1281m) au Nord –Est du bassin.

De nombreux cours d'eaux naissent sur les pentes de cette chaîne et descendent soit vers le nord, soit vers le sud comme l'oued Smendou. Les grands ensembles comme l'oued Rhumel comme dans notre bassin, descendent des hautes plaines, ils ont pu creusées de profondes vallées aux versants raides, à la traverser de ces massifs, ou ils ont pu tailler d'étroites gorge comme celui de Beni Haroun, à son passage de la chaîne Zouagha.

Dans ces secteurs aux pentes fortes, les processus d'érosion ont selon la nature lithologique des terrains, d'une ampleur plus ou moins grande.

II.3.1.2. Les piedmonts sud-tellien

Ils correspondent au bassin néogène de Constantine. C'est une grande dépression s'étendant de Mila à l'ouest jusqu'à Zighoud Youcef à l'est du bassin. Ils sont limités par les hautes plaines au sud. Il s'agit de basses collines aux formes molles, taillées dans du matériel tendre et un réseau de ravins donne au relief un aspect disséqué.

Le bassin comporte quelques reliefs calcaires isolés. Il s'agit des djebels Lakhel (1256m) et Kef En Sour (690m) au Nord-Ouest du bassin, Bergli (770m) au Nord. Ils correspondent à des séries charriées vers le sud pendant la phase alpine.

II.3.1.3. Les hautes plaines constantinoises

Localisées généralement entre l'atlas tellien au nord et l'atlas saharien au sud, elles correspondent à la limite sud du bassin.

C'est une couverture de nappes venues du nord, ces terrains d'âge quaternaire à dominance marneuse et dont les altitudes sont plus ou moins importantes de 800 à 900m, où émergent en horsts des massifs calcaires : djebels Feltene (1113m) ; Teioualt (1285m) au sud ; Grouz (1187m) au sud Est ; Oum Settas (1326m) au Sud-ouest Guerioun (1729m), fortas (1477m) au Sud-ouest du bassin. Il s'agit d'un ensemble de massifs calcaires appartenant à une structure d'orientation Sud-ouest – nord -est.

II.3.2. Les altitudes

Les altitudes dans le bassin de notre étude varient de 200 à 1400 m, Le tableau ci-dessous, montre les tranches d'altitudes dans le bassin. Des fréquences altimétriques apporte plusieurs précisions. La classe maximum de la courbe des fréquences altimétriques, se situe entre 800 et 900 m, avec une superficie de 1461,2 km² de l'aire réceptrice du bassin.

Tableau 9: Les classent des altitudes dans le bassin.

| Classe d'altitude | superficie (km ²) |
|-------------------|-------------------------------|
| <200 | 20,81 |
| 200-300 | 69,19 |
| 300-400 | 178,07 |
| 400-500 | 263,23 |
| 500-600 | 253,55 |
| 600-700 | 446,38 |
| 700-800 | 1337,93 |
| 800-900 | 1461,32 |
| 900-1000 | 1145,22 |
| 1000-1100 | 88,55 |
| 1100-1200 | 42,34 |
| 1200-1300 | 18,51 |
| >1400 | 2,9 |
| Total | 5328 |

II.3.3.Les pentes

Les classes des pentes sont les suivantes :

La classe très faible (<3%)

D'une superficie de 2671,20 km², soit 50,14% de la surface totale du bassin, cette classe de pente y très répandue, elle regroupe la partie des hautes plaines au sud du bassin et les bords des oueds, constitués de formations quaternaires. Ces zones à topographie plus ou moins planes représentent le siège de l'érosion linéaire surtout.

La classe moyenne (3-25%)

La superficie de cette classe est de 1722,59 km², soit 32,33% de la superficie totale du bassin. Cette classe désigne les piedmonts montagneux des Djebels Kellel, Bergli, La khal et Chettaba au Nord Est du bassin, les piedmonts de Djebels Oum Settas, Felten, elle concerne des zones dans la partie centrale du bassin, et au Sud Est du bassin aux piedmonts du Dj.Guerioun, constituées essentiellement de formations miopliocène exposés au ruissellement à caractère torrentiel.

La classe forte (25-35%)

Cette catégorie de pentes désigne les versants montagneux, d'une superficie de 559,85 km², soit 10,5 % de la superficie totale du bassin. Elle apparaît sur les versants de Djebel Chettaba au Nord - Est du bassin, au centre sur les versants de

Djebels Felten et Oum Settas, et en grande partie au nord sur le versant Sud de la chaîne numidique.

La classe très forte (>35%)

Cette classe est la moins répandue dans le bassin, d'une superficie de 237,56 km², soit 4,45 % de la superficie totale du bassin. Elle désigne les sommets montagneux des djebels Sidi Driss, Bit Djezia au nord du bassin, Ouahch au nord-est, et les versants des chaînes calcaires des Djebels Oum Settas à l'est du bassin, et Guerioun Nif N'sser au sud du bassin.

II.4. Les grands ensembles géologiques

L'histoire géologique du Bassin de Rhumel-Boumerzoug est particulièrement mouvementée et marquée par un empilement d'unités structurales du Nord au Sud.

La carte géologique montre en relief l'existence d'une mosaïque de terrains et de structures plus ou moins complexes dont le résultat se traduit par une grande diversité des ressources souterraines tant sur le plan quantitatif que qualitatif.

En effet, à l'opposition topographique par laquelle se caractérise le bassin, s'ajoute une opposition structurale qui se traduit par un substratum relativement simple au sud formé de vastes étendues sédimentaires d'où émergent des massifs calcaire isolés, et d'un édifice beaucoup plus complexe au nord constitué de nombreuses séries hétérogènes empilées durant les phases tectoniques successives.

Ainsi, on distingue du nord au sud les nappes suivantes :

II.4.1. La nappe néritique

La nappe néritique constantinoise constitue l'autochtone relatif. Elle correspond à l'essentiel du relief calcaire au Sud du bassin. Les affleurements importants correspondent aux djebels Oum Settas, le rocher de Constantine, Kellel, le Kheneg, Felten et djebel Grouz, Guerioun et Teioualt. Ils sont dispersés en massifs de taille variable par l'effet de la néotectonique surtout. De bas en haut, ces terrains sont d'âge jurassique supérieur carbonaté. Ils se dévoilent au Kheneg de Tiddis, djebel Teioualt et au djebel Kerkera jusqu'au sénonien inférieur transgressif détecté sur le rocher de Constantine et djebel Kellel.

II.4.2. Les nappes telliennes

Les nappes telliennes sont développées sur toute la moitié nord du bassin. Paléo géographiquement et du nord au sud, on peut distinguer : les séries ultra-telliennes, les séries telliennes ses-stricto et les séries peni-telliennes.

II.4.2.1. La nappe ultra-tellienne

De haut en bas on trouve : Yprésien-lutétien inférieur, calcaire à silex jusqu'au crétacé inférieur marneux. Ces séries sont peu étendues dans le bassin, de minuscules affleurements de ces séries apparaissent sur djebel Lakhel au nord-ouest du bassin et au nord-ouest de djebel el Ouahch, en discordances. Par contre elles prennent un développement notable au centre près de Constantine.

II.4.2.2. La nappe sensu stricto

Les formations de cette nappe sont d'âge Eocène et prennent une grande ampleur au sud du bassin. Elle se situe entre les deux monts de djebel Felten et Oum Settas au sud du bassin.

Ces séries forment un ensemble structural cohérent, définies à partir de deux critères simples :

- Absence d'influences néritiques dominantes.
- Absence de faciès clair ultra-tellien.

Le caractère commun de ces structures est d'être assez systématiquement associé à une semelle triasique. Du bas en haut, ces séries vont du lutétien à priabonien marneux jusqu'au sénonien inférieur. Ces formations marneuses et marno-calcaires, possèdent toutes des discontinuités notables au-dessus d'un jurassique carbonaté, marquées par des intercalations conglomératiques épisodiques. Lorsque ces séries ont une faible extension, ces discontinuités peuvent paraître et l'on parle naturellement de phases tectoniques caractéristiques.

II.4.2.3. La nappe peni-tellienne

Le terme peni-tellien a été créé pour désigner une série allochtone du versant du djebel Zouaoui dans le massif de Chettaba, au Sud-Ouest de Constantine.

Ces séries sont à faciès très carbonaté, marneuses, elles ont été longtemps confondues avec les formations carbonatées autochtones des séries néritiques constantinoises. Elles affleurent :

- En fenêtres sous les nappes telliennes S.S. : monts d'Ahmed Rachedi, Sidi Merouane et djebel Lakhel ou l'on observe la série la plus complète au nord-ouest du bassin.
- En superposition anormale sur la nappe néritique constantinoise, en lambeaux charriés : au Kheneg de Tiddis, djebel Grouz, et djebel Chettaba.

II.4.3. La nappe numidienne

Peu développée dans notre bassin, elle affleure dans la partie Nord – Est sur les monts de Djebel El Ouahch et près de Ain Abid et Sigus au sud du Djebel Oum

Settas. Ce terme a été employé pour bien des formations différentes à partir Du moment où elles étaient gréseuses et apparemment dépourvues de faunes. C'est le cas de beaucoup d'affleurements actuellement rapportés au crétacé inférieur. De bas en haut on rencontre :

- Argiles « sous-numidiennes »
- Grès numidiens
- Argiles, marnes « Supra-numidiennes »

II.4.4. Les formations post-nappes

L'essentiel des affleurements post nappes occupent de vastes espaces des hautes plaines constantinoises, elles concernent :

II.4.4.1. Le miopliocène

Il affleure sur toute la partie Nord du bassin. Dans la partie Nord-Est, entre Mila et Azzeba, les formations sont argileuses et affleurent dans de mauvaises conditions. Il s'agit de matériels de remblaiement de dépressions topographiques.

Les premiers niveaux paraissent appartenir au miocène supérieur et sont caractérisés par l'abondance d'éléments grossiers détritiques, reflétant assez fidèlement l'environnement montagneux.

Au-dessus, on peut distinguer un groupe de terrains restés horizontaux sur de grandes surfaces : Ce sont des argiles, de marnes gypsifères, de calcaires lacustres, de conglomérats, de grès, et de sables. Tout ce dépôt présente des variations rapides et considérables.

II.4.4.2. Les formations quaternaires

Elles sont constituées essentiellement de :

- ✚ Eboulis développés sur dans la partie nordique des grès numidiens.
- ✚ Alluvions récentes : limons, graviers et galets constituant les alluvions actuelles (lit majeur des oueds) ou récentes (terrasse gharbienne). Ces formations sont présentent le long des oueds Rhumel, Boumerzoug,...
- ✚ Formations de terrasses, formations de pente et quaternaire indéterminé : elles se localisent le long des principaux oueds (niveaux 2 à 5). Ce dernier ne peut que très rarement se distinguer, sur l'oued Boumerzoug.

Les formations en pente se localisent surtout dans les zones argileuses ou marneuses. Il s'agit de revêtement limoneux portant des sols bruns, peu ou pas calcaires permettant la culture céréalière avec de bons rendements lorsque l'érosion ne les érafle pas trop.

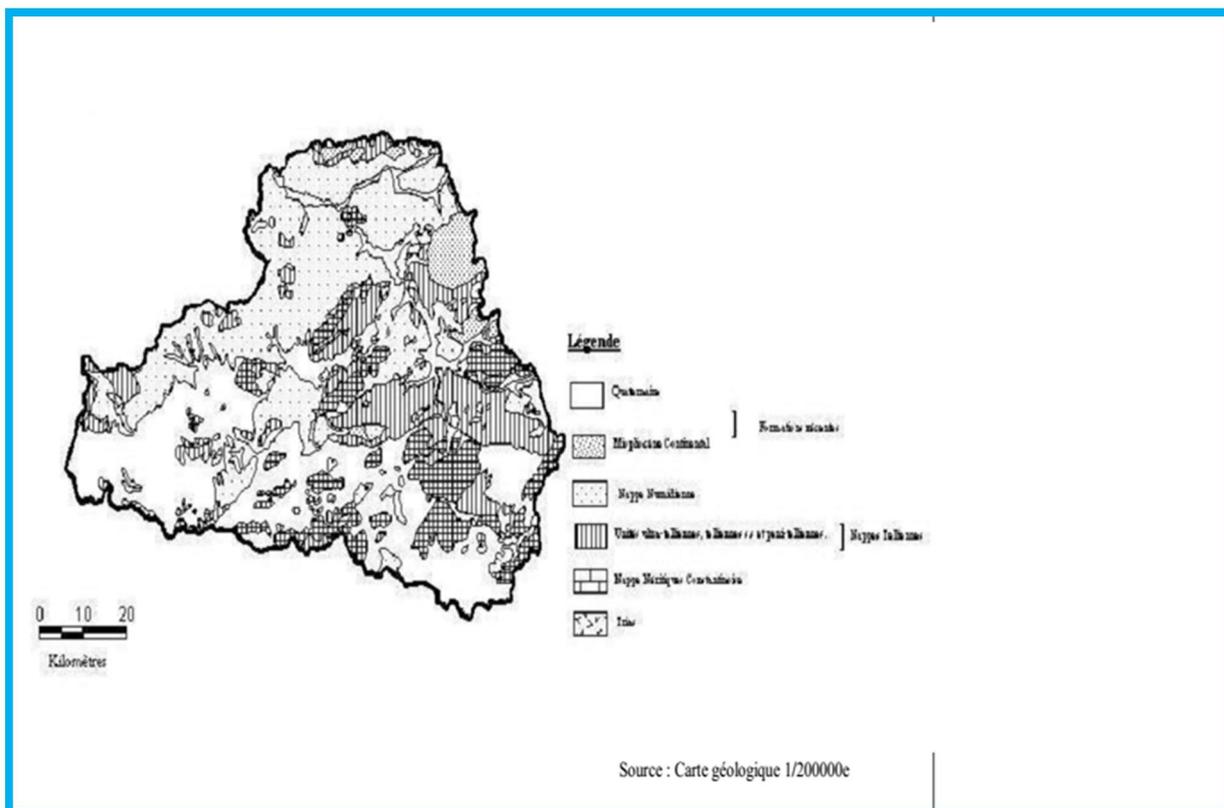


Figure 10 : Structure géologique de sous bassin de Rhumel-Boumerzoug.

II.5.Capacité de perméabilité des formations lithologiques

On s'intéressera ici à décrire les formations lithologiques afin de préciser leur capacité aquifère. Il s'agit de les regrouper en deux grands ensembles compte-tenu à la fois à leur perméabilité.

II.5.1. Les formations perméables :

II.5.1.1.Les formations calcaires

Il s'agit des calcaires marneux ou à alternances marneuses. Ces faciès se rapportent à la nappe néritique constantinoise.

Ces séries épaisses sont d'une puissance importante, très fissurés par suite d'une importante évolution karstique, ce qui leur donne une perméabilité très élevée.

Très étendues et de faible épaisseur représentent des nappes phréatiques plus ou moins continues et facilement exploitables, ce qui les rend en relation directe avec le régime hydrologique. Elles sont largement étendues dans le secteur des hautes plaines paradoxalement aux précipitations qui sont très faible.

Ces nappes proches de la surface du sol sont soumises à l'évapotranspiration dans les effets se traduit par la salure des eaux, d'un cote et leurs contaminations par des provoquée par le lessivage des terrains percolés.

II.5.1.2. Les formations gréseuses

Elles correspondent au grès numidiens, d'âge oligocène, affleurant sur les monts de djebel Ouahch au nord-est du bassin. Ces formations, à des altitudes très élevées, sont de faibles réserves souterraines atténuées la présence d'intercalations argileuses d'une part et par la faiblesse des fissurations des roches. La perméabilité en petit ou l'inter stratification n'est pas, cependant, négligeable et favorise l'émergence de sources au pied de djebels, à débit généralement faible.

II.5.2. Les formations imperméables

Cet ensemble regroupe le reste des formations à dominance argileuse ou marneuse du miopliocène continental et du crétacé-éocène .Elles sont les plus largement représentées. L'ensemble des roches concernée sa de faible perméabilité d'interstices ou de fissures, ne déterminant donc pas d'aquifères notables. Cependant, compte tenu de leur caractère lithologique particulier. Cette série mérite l'attention au vu de son extension considérable et de son aspect hydrogéologique assez particulier. Elle est très irrégulière, à la fois dans son épaisseur et dans son faciès.

Ces séries à perméabilité très faible, peuvent représenter des possibilités d'infiltration en raison des niveaux travertin eux (calcaires lacustres) dans les secteurs localisées se traduisant par des points d'eau dispersée (la source de Marcho) qui alimente la ville de Mila. La puissance de ces calcaires lacustres varie entre 50-800mdans la région de Sidi Merouane (D.Delga, 1955), elle atteint environ 70m autour du massif du Kheneg (P.Deleau, 1952).

Les séries marneuses du crétacé-Eocène, ne représentent quant à elles, aucune possibilité d'accumulation en eaux souterraines, les autres formations représentant par des alternances de faciès différends, telle que l'ensemble argilo-gréseux de l'oligo-miocène, les marnes et marno-calcaires du crétacé-Eocène, offrent une certaine capacité d'accumulation, liés aux intercalations perméables, mais leurs ressources sont très restreintes, en raison du développement et l'extension relativement réduites de ces niveaux perméables. [5]

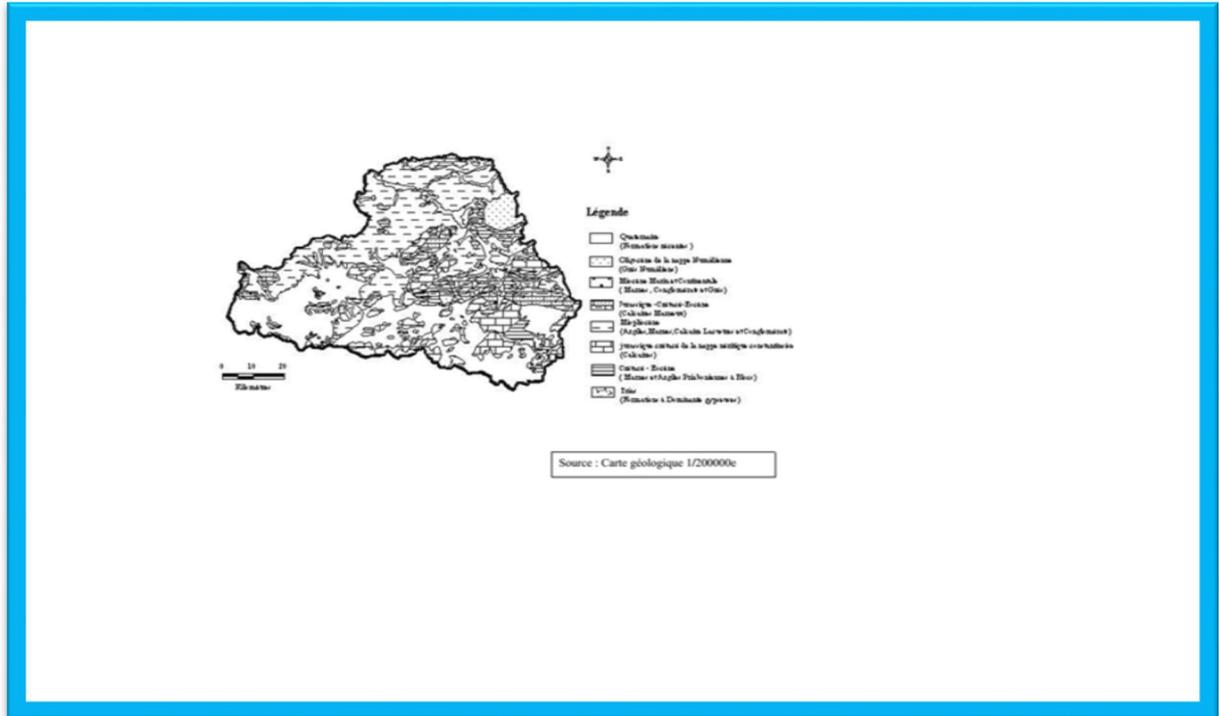


Figure 11 : Les ensembles lithologiques de sous bassin de Rhumel-Boumerzoug.

Conclusion

Le bassin de Rhumel-Boumerzoug montre une opposition topographique. Aux hautes plaines situées au sud du bassin, à topographie simple, qui donne des limites un peu floues au bassin, succède l'atlas tellien, au Nord, à la limite bien nette.

Une opposition géologique s'ajoute à cette opposition topographique, se traduisant par un substratum assez simple au sud formé de vastes étendues sédimentaires d'âge quaternaire, et d'où émergent des massifs calcaires isolés. Au nord, un relief fortement accidenté, de structure très complexe, constitués de séries hétérogènes empilées au cours de phases tectoniques successives.

CHAPITRE III

LES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DU BASSIN

Introduction

L'étude des caractéristiques climatiques d'un bassin versant est nécessaire pour la connaissance du comportement hydrologique de ses cours d'eau .

Les caractéristiques les plus originales de toute la région sont réunies dans le bassin de Rhumel-Boumerzoug. Le nord s'avère être une zone humide et pluvieuse et le sud avec un climat semi-aride à aride.

Cette opposition trouve son origine dans de multiples causes :

- ✚ Le nord influencé par un climat méditerranéen, le sud par un climat de type continental.
- ✚ La répartition des ensembles montagneux, les contrastes renforçant cette disparité géographique.

Dans ce chapitre, on s'intéressera à évaluer trois paramètres climatiques jugés importants : les précipitations, les températures et l'évapotranspiration.

Le travail a été réalisé Malgré l'insuffisance et le manque de fiabilité de certaines données pluviométriques ainsi que de la faible densité du réseau d'observations météorologiques.

Il y a lieu de noter que nous disposons d'une série des données pluviométriques s'échelonnant sur 24 années d'observation (1990 -2014).

III.1.Répartition de station météorologique dans la zone d'étude

Dans le cadre de ce travail, on se contente d'étudier les données de l'ONM (Office National de la Météorologie) : Ain El Bey de Constantine.

Tableau 10 : Coordonnées de la station utilisée.

| Stations | Coordonnées | |
|-------------------------|-------------|---------|
| | X | Y |
| Ain El Bey(Constantine) | 36°.17' | 06°.37' |

III.2. Les Précipitations

Les précipitations constituent évidemment, le paramètre climatique essentiel. Leur intensité, leur continuité et leur périodicité sont l'origine même de l'écoulement, de sa localisation et de sa violence.

Dans certaines régions, où le régime des écoulements est fortement lié aux précipitations. [5]

III.2.1. Variabilité annuelle des précipitations

III.2.1.1. Estimation de la lame précipitée

La lame moyenne annuelle précipitée au niveau du bassin est calculée en rapportant la somme des valeurs des précipitations annuelles des stations d'Ain El Bey au nombre d'années de la période d'étude comme le montre la formule suivante :

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{n} \quad [10]$$

Avec :

- \bar{P} : Précipitation moyenne annuelles,
- $\sum P_i$: La somme des précipitations annuelles,
- n : le nombre des années de la période d'étude.

La précipitation moyenne annuelle au niveau du bassin versant de l'Oued Rhumel-Boumerzoug durant la période d'observation de 24 années (1990/91 à 2013/2014) est estimée à 524,1mm (Voir Figure12).

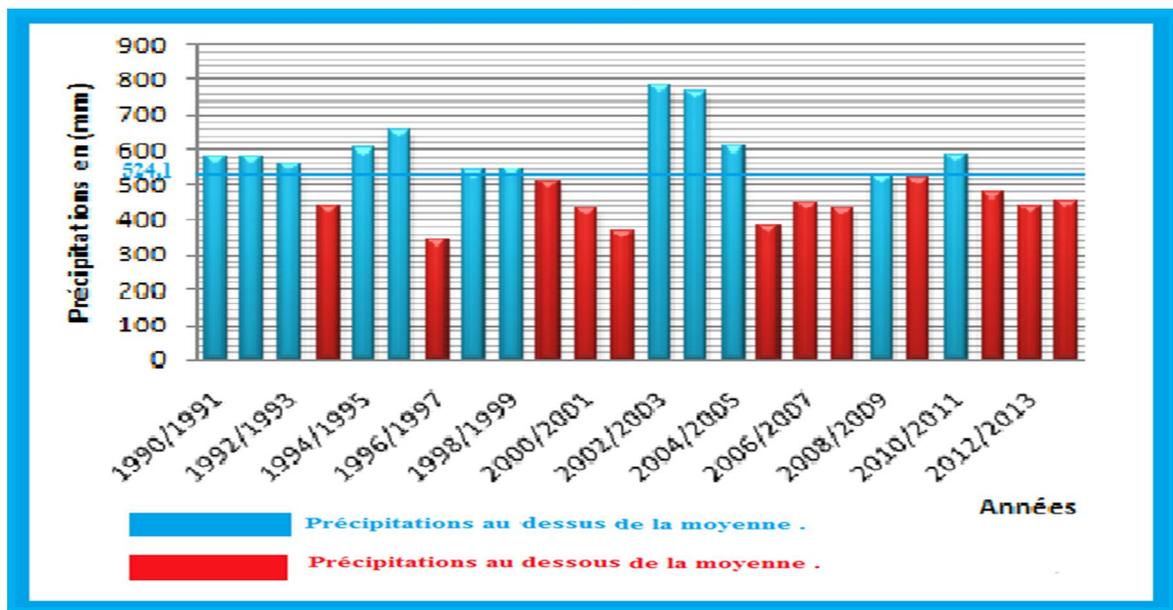


Figure12 : Variation annuelle des précipitations.

La figure (12) représente la série pluviométrique durant 24 ans de 1900 à 2014 pour cette période en remarque que :

- ✚ Le maximum a été observé en 2002/2003 avec 785,8mm.
- ✚ Le minimum en 1996/1997 avec 339,8mm.
- ✚ La moyenne annuelle des pluies précipitées pour la période (1900-2014) est de 524,10mm.

En général, on peut dire que la station qui reflète le caractère pluvieux de notre zone d'étude se trouve dans une région bien arrosée, soumise à des pluies caractérisées par d'importantes irrégularités annuelles temporelles.

III.2.1.2. Coefficient pluviométrique

Afin de distinguer les années sèches des années humides, on définit le coefficient pluviométrique qui est exprimé par le rapport de la précipitation annuelle sur la précipitation moyenne annuelle. Ce coefficient est défini par :

$$C_p = \frac{P_i}{\bar{P}} \quad [10]$$

D'où :

P_i : La précipitation annuelle (mm),

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

Pour les valeurs du coefficient pluviométrique supérieures ou égales à l'unité ($C_p \geq 1$), on considère que l'année est humide et les valeurs inférieures à l'unité ($C_p < 1$) correspondent à l'année sèche.

Tableau 11 : Valeurs des coefficients de pluie pour la série de données météorologique.

| Années | P_i (mm) | \bar{P} (mm) | C_p |
|-----------|------------|----------------|-------|
| 1990/1991 | 580,3 | 524,13 | 1,11 |
| 1991/1992 | 580,4 | 524,13 | 1,11 |
| 1992/1993 | 561,2 | 524,13 | 1,07 |
| 1993/1994 | 441,4 | 524,13 | 0,84 |
| 1994/1995 | 600,7 | 524,13 | 1,15 |
| 1995/1996 | 656,7 | 524,13 | 1,25 |
| 1996/1997 | 339,8 | 524,13 | 0,65 |
| 1997/1998 | 538,8 | 524,13 | 1,03 |
| 1998/1999 | 543,2 | 524,13 | 1,04 |
| 1999/2000 | 511,6 | 524,13 | 0,98 |
| 2000/2001 | 433,6 | 524,13 | 0,83 |
| 2001/2002 | 367,7 | 524,13 | 0,70 |
| 2002/2003 | 785,8 | 524,13 | 1,50 |
| 2003/2004 | 767,6 | 524,13 | 1,46 |
| 2004/2005 | 606,3 | 524,13 | 1,16 |
| 2005/2006 | 382,4 | 524,13 | 0,73 |
| 2006/2007 | 447,6 | 524,13 | 0,85 |
| 2007/2008 | 430,7 | 524,13 | 0,82 |
| 2008/2009 | 526,7 | 524,13 | 1,00 |
| 2009/2010 | 520,4 | 524,13 | 0,99 |
| 2010/2011 | 586,8 | 524,13 | 1,12 |
| 2011/2012 | 478,1 | 524,13 | 0,91 |
| 2012/2013 | 437,9 | 524,13 | 0,84 |
| 2013/2014 | 453,3 | 524,13 | 0,86 |

On observe que le nombre d'années humides est nettement égal aux années sèches au niveau de la station d'Ain El Bey. En effet en compte 12 années humides et seulement 12 années sèches.

Ceci confirme que le bassin versant d'Oued El Rhumel-Boumerzoug est exposé à des pluies modérées. Les valeurs du coefficient pluviométrique varient d'une année à autre et pour une meilleure interprétation, ces valeurs ont été représentées sur des graphiques en fonction des années d'observation (Voir Figure13).

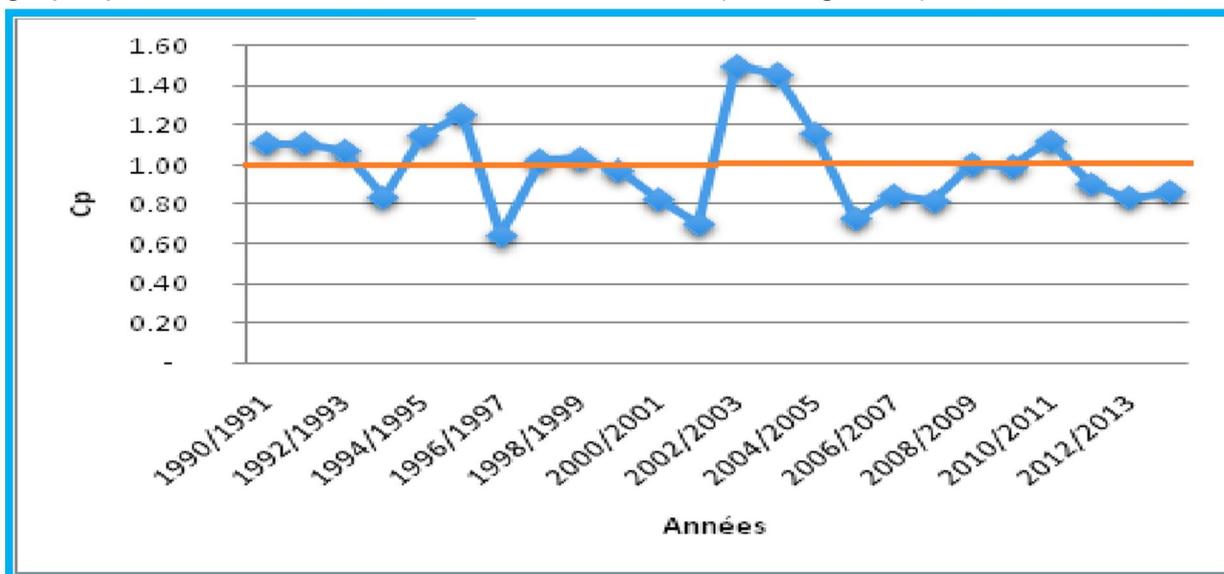


Figure.13 : Variation du coefficient pluviométrique au niveau de station pluviométrique.

Les années extrêmes humides et sèches sont marquées respectivement par deux pics opposés. Pour cette station l'année de forte humidité est observée en 2002/2003 avec $C_p=1,50$ et en 2003/2004 avec $C_p=1,46$. Après ces apogées, on remarque une diminution proportionnelle des valeurs des coefficients pluviométriques (2004/2005).

Malgré toutes les variations complexes du coefficient pluviométrique observées au niveau de la station on peut dire, d'une façon générale, que les périodes sèches et humides se sont étendues d'une manière équilibrée durant les 24 années de la série d'étude.

On en conclut donc que le bassin de l'Oued El Rhumel-Boumerzoug est exposé à un bioclimat de type méditerranéen Subhumide.

III.2.1.3. Etude des valeurs extrêmes annuelles

L'étude des valeurs extrêmes annuelles est intéressante du moment que la station météorologique enregistrent parfois des hauteurs de pluie qui dépassent largement la moyenne de leur régime pluvial ou le contraire.

A cet effet, nous avons étudié le caractère pluvieux propre à chaque année de la série. Il y a donc lieu de calculer l'écart à la moyenne annuelle correspondant à l'excédent et au déficit des précipitations de l'année considérée rapporté à la moyenne de 24 années. Cet écart est donné par la formule suivante :

$$E_{\%} = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100 \quad [10]$$

Avec :

$E_{\%}$: Ecart en% .

P_i : Précipitation annuelle (mm),

\bar{P} : Précipitation moyenne annuelle (mm).

Les écarts aux moyennes des précipitations annuelles calculés pour la station météorologique d'Ain El Bey.

Ces écarts varient d'une année à l'autre, ceux qui portent des signes positifs sont supérieurs aux moyennes, les autres sont inférieurs à cette dernière et portent un signe négatif.

La valeur extrême d'écart positif correspond à l'année la plus forte pluviosité (année extrême humide) ; cet écart est de l'ordre de 49,93%.

L'année à plus faible pluviosité (années extrêmes sèches) est caractérisée par la valeur extrême négative d'écarts qui est d'ordre -35,17%.

Il se trouve qu'il existe une année extrême humide et extrême sèche commune pour la station d'Ain El Bey. Comme il a été déjà montré avec le coefficient pluviométrique, ces années sont respectivement : 2002/03 et 1996/97. Le tableau suivant donne la représentation d'année extrême humide et sèche pour la station d'Ain El Bey.

Tableau 12 : Représentation d'année extrême humide et sèche.

| | Année extrême humide | | | Année extrême sèche | | |
|--------------|----------------------|--------|---------|---------------------|---------|---------|
| Moyenne | P (mm) | Ecart | Année | P (mm) | Ecart | Année |
| 524,1 | 785,8 | 49,93% | 2002/03 | 339,8 | -35,17% | 1996/97 |

Durant les 24 années d'observation, la station d'Ain El Bey a connu d'importantes fluctuations des précipitations car elle présente les valeurs extrêmes d'écart positif et négatif.

La valeur de la pluie maximale s'écarte d'environ 49,93% en dessus de la pluie moyenne annuelle et enregistre une hauteur de 785,8 mm ; par contre la pluie minimale est de 339,8mm. Cette valeur est à 35,17% en dessous de la pluie moyenne annuelle de cette station.

III.2.1.4. Paramètres de dispersion

Le phénomène de dispersion des modules pluviométriques s'exprime par le coefficient de variation. La variation d'une série de données est fonction du rapport de l'écart type sur la moyenne, ainsi l'ampleur de la valeur numérique de ce rapport reflète une importante fluctuation et vice versa.

Le coefficient de variation est défini par :

$$C_v = \sigma / \bar{P} \quad [10]$$

Où :

C_v : Coefficient de variation,

σ : Écart type,

\bar{P} : Pluie moyenne annuelle (mm).

Nous utilisons ce coefficient afin d'obtenir une approche de la complexité des fluctuations des précipitations interannuelles. Les valeurs du coefficient de variation calculée pour la station d'Ain El Bey sont illustrées dans le tableau qui suit :

Tableau 13 : Valeur du coefficient de variation pour la station pluviométrique.

| | \bar{P} | σ | Cv |
|------------|-----------|----------|------|
| Ain El Bey | 524,13 | 106,17 | 0,20 |

III.2.2. Variation mensuelle des précipitations

L'étude de la variabilité inter-mensuelle des précipitations a été effectuée en calculons la moyenne mensuelle de chaque mois pour toutes les années de la série. La figure ci-dessous donne une représentation graphique des données :

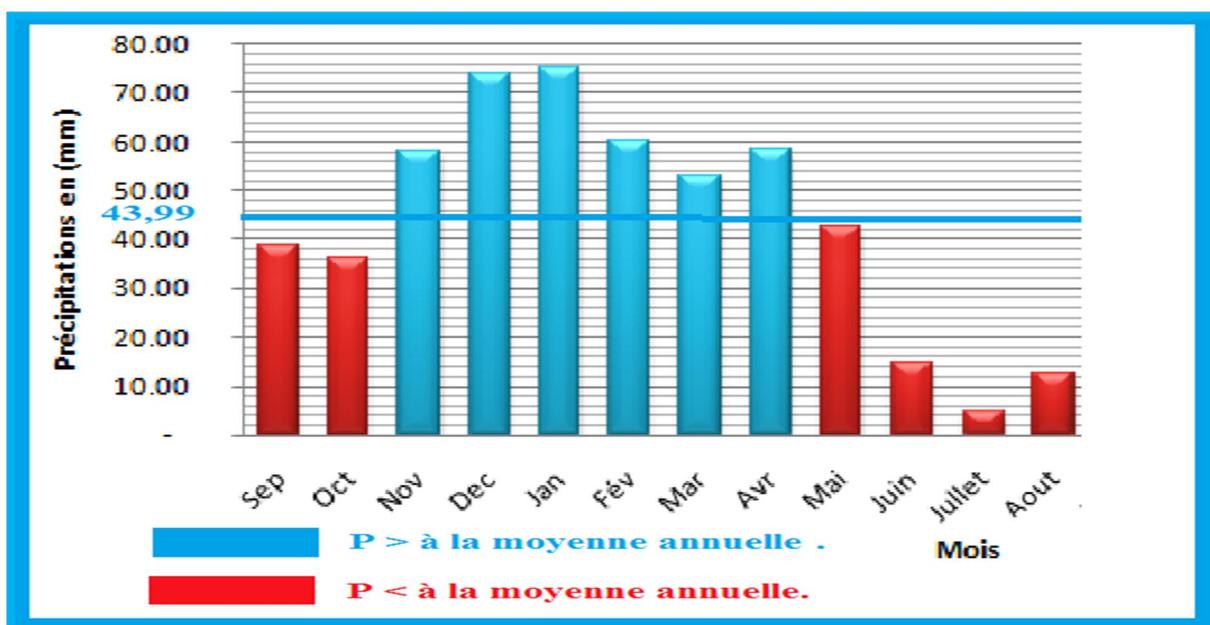


Figure14 : Variations des précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain El Bey.

On remarque que les mois de Janvier et Décembre sont le plus pluvieux avec des précipitations qui atteignent une hauteur de 75,09 et 73,75 mm, Par contre, le gradient mensuel des précipitations commence à chuter et affleure des valeurs très faibles qui coïncident avec les mois de Juillet et Aout. Le mois de Juillet est considéré comme le mois le plus sec avec seulement 4,76mm. On peut dire qu'il existe deux périodes distinctes :

- ✚ Une période très sèche représentée par les mois de Juillet et Aout,
- ✚ Une période humide correspondant aux autres mois de l'année.

III.2.3. Variations saisonnières

Il semble que la variation mensuelle des précipitations est plus significative au regard des saisons. Pour cela, nous avons calculés les précipitations moyennes des saisons. La figure 15 donne une représentation graphique des précipitations moyennes saisonnières de la station d'Ain El Bey de Constantine :

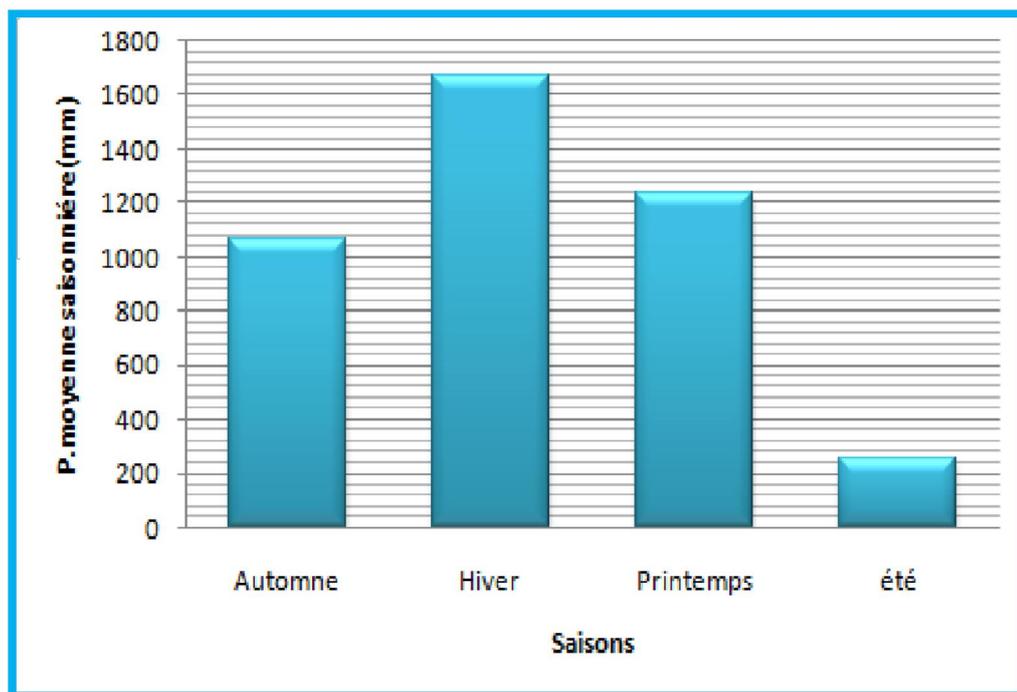


Figure15 : Variations des précipitations moyennes saisonnières.

D'après la figure.15, il est clair que la saison d'été est la plus sèche avec une valeur de 256,37mm La saison hivernale est considérée comme la saison la plus humide. D'autres parts, nous constatons que la saison printanière présente une période de pluviosité plus importante que celle de la saison automnale.

III.3. Les Températures

Actuellement, si le bassin de Rhumel-Boumerzoug possède un réseau d'observation moyennement dense, en revanche, la carence en matière de mesures thermométriques se fait nettement sentir.

L'existence d'une seule station, celle de Constantine, située sur le plateau d'Ain El Bey, au centre du bassin, contrôlée par l'Office National de la Météorologie (O.N.M). Cette station dispose de données récentes, homogènes et de longues durées. [5]

A cet effet, pour les analyser, on a pris la même durée (24ans) que pour les précipitations, c'est à dire de 1990 à 2014.

III.3.1. Température moyennes annuelles

Les températures annuelles, varient de 14,1 à 16,4 °C, l'année 1991/1992, a enregistré une température minimale de 14,1°C. Les températures maximales on atteint leurs pics durant l'année 2002/2003 avec 16,4°C, la moyenne annuelle des températures de la période 1990/2014, est de 15,7°C.

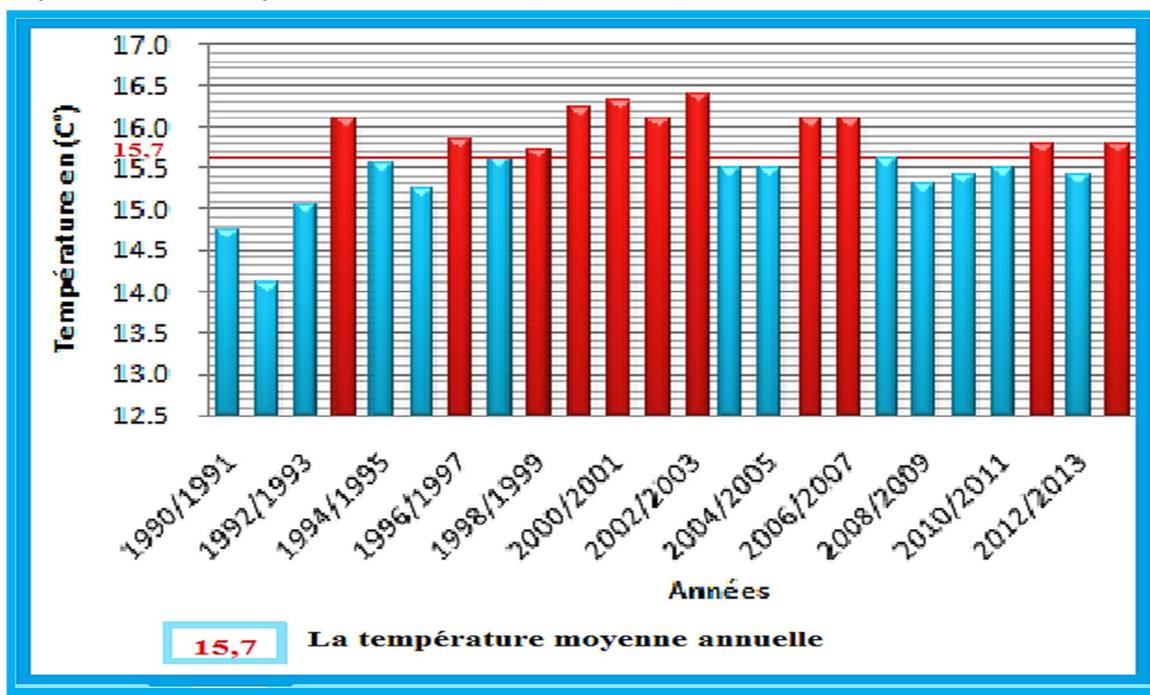


Figure16 : Température moyennes annuelles 1990/2014 de station d'AIN El Bey.

III.3.2. Température moyennes mensuelle

Selon les données à cette station (Figure17), il s'avère que, contrairement aux précipitations, les mois thermiques sont bien tranchées : les mois chaud s'étend de Mai à octobre, quant au mois froid, elle s'étend de novembre à avril.

Le maximum des températures est atteint en août et juillet 26,59°C, et le minimum en janvier avec près de 6,8°C.

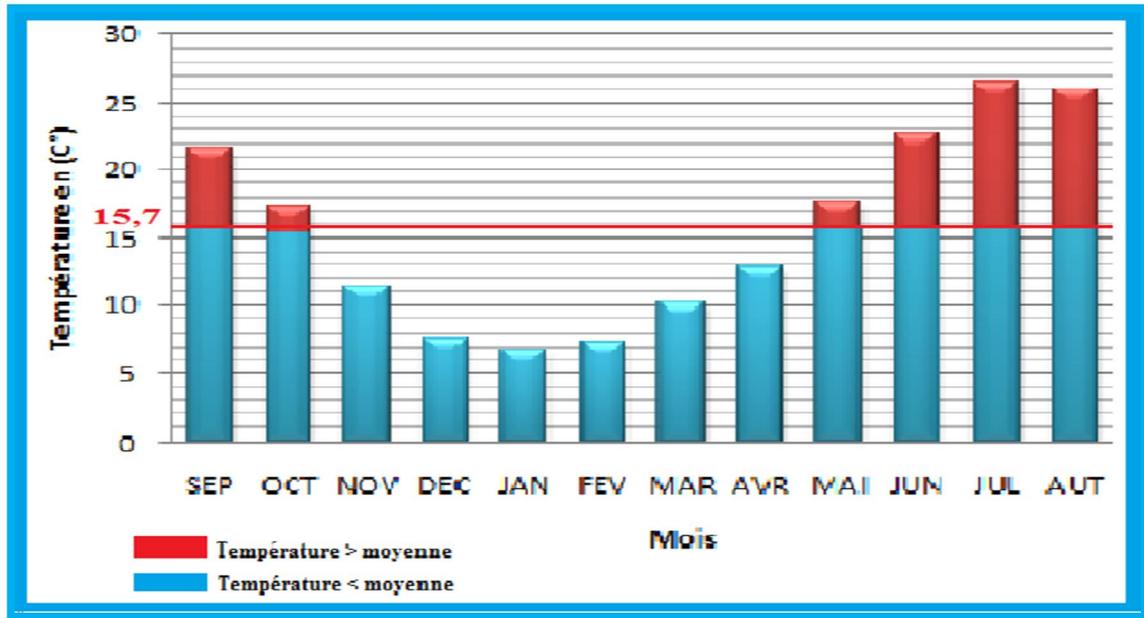


Figure17 : Diagramme thermique 1990/2014 de station d'Ain El Bey.

III.3.3. Relation précipitations –températures

Ces diagrammes représentent, sur un même système d'axes, la variation des températures et celle des précipitations moyennes mensuelles. Nous avons porté les valeurs des températures moyennes à l'échelle double des précipitations moyennes mensuelles sur l'axe des ordonnées, les différents mois de l'année figureront sur l'axe des abscisses (Figure18).

L'utilisation de la méthode pluvio-thermique va nous permettre, avec plus de précision, de déterminer les périodes humides et sèches. Les allures des courbes de variation des précipitations sont en opposition avec celles des variations des températures moyennes indiquant la présence. [10]

- ✚ Une longue période humide constituée de 8 mois, entre Octobre et Mai.
- ✚ Une période sèche débutant à partir de juin, proprement dite, jusqu'à Septembre.

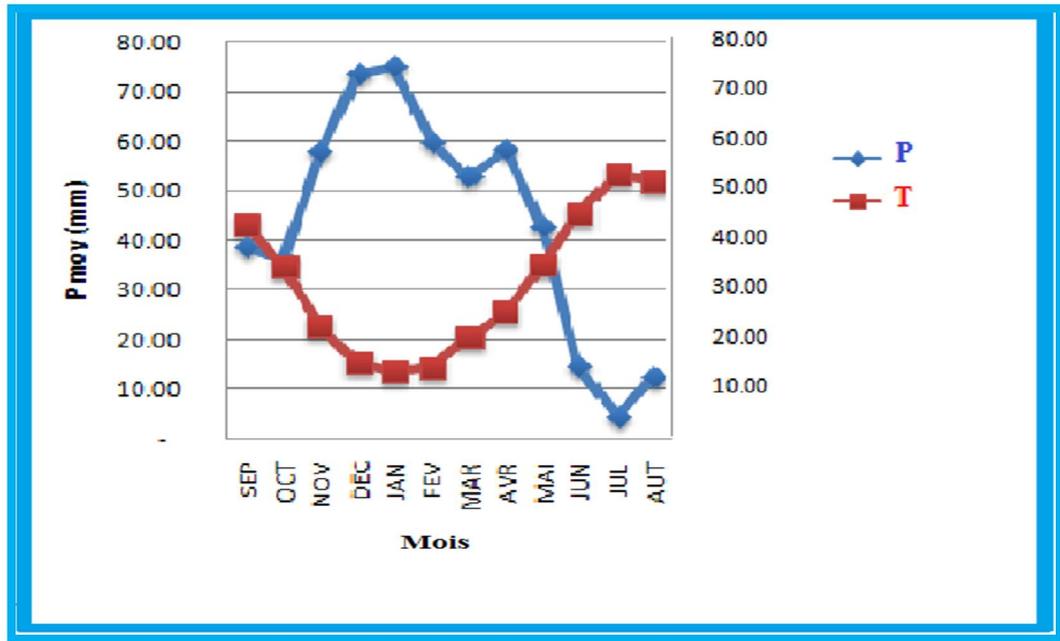


Figure18 : Diagrammes pluvio-thermiques

En général, les périodes humides pour la station étudiée sont marquées par des températures très faibles par rapport à la température moyenne annuelle notamment pour les mois de Janvier, et des hauteurs de précipitations maximales observées surtout entre les mois de Novembre et Janvier. Les périodes sèches sont caractérisées par la rareté des pluies surtout pour les mois de Juin, Juillet et Août, au cours desquels les températures atteignent leurs maxima.

III.4. Evapotranspiration

La température joue un rôle très important en agissant sur l'évaporation de l'eau du sol et sur l'augmentation de la consommation par le végétal (transpiration). Ce phénomène de déperdition d'eau du sol et du végétal est connu sous le nom d'évapotranspiration. Celle-ci sera d'autant plus importante que la température sera plus élevée, que l'air sera sec, qu'il y aura du vent chaud et que le rayonnement sera intense.

Le calcul de l'évapotranspiration potentielle ou ETP permet de caractériser, pour une région et pour une année donnée, son climat. C'est une donnée bioclimatique qui correspond à la quantité d'eau maximale susceptible d'être évaporée par le couvert végétal qui s'exprime, comme les pluies, en mm de hauteur d'eau.

Pour le cas qui nous intéresse, nous avons utilisé la formule de Thornthwaite (1948). La raison pour laquelle nous l'avons choisie s'explique par le fait que cette formule est basée uniquement sur les facteurs climatiques et géographiques, et qu'elle a tendance à sous-estimer les besoins en eau pour les zones méditerranéennes. Elle est donnée comme suit :

$$ETP = 16 \times (10 \times T/I)^a \quad [10]$$

Avec :

T : température moyenne mensuelle en degré Celsius,

I : Indice annuel global égal à la somme des 12 indices mensuels,

$$a = 0,016 \times I + 0,5.$$

Le tableau représente les valeurs de l'évapotranspiration correspondant aux températures moyennes mensuelles ainsi que les précipitations moyennes mensuelles de la station d'Ain El Bey de Constantine :

Tableau 14 : Evapotranspiration potentiel ETP (mm).

| Mois | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jun | Jul | Aout |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| T | 21,51 | 17,35 | 11,38 | 7,72 | 6,80 | 7,29 | 10,22 | 12,83 | 17,57 | 22,69 | 26,59 | 26,03 |
| P | 38,78 | 36,11 | 58,03 | 73,75 | 75,09 | 60,03 | 52,88 | 58,45 | 42,70 | 14,78 | 4,76 | 12,51 |
| i | 9,11 | 6,58 | 3,47 | 1,93 | 1,59 | 1,77 | 2,95 | 4,16 | 6,70 | 9,88 | 12,56 | 12,15 |
| I | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 | 72,85 |
| a | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 1,67 |
| ETP | 97,14 | 67,87 | 33,61 | 17,63 | 14,28 | 16,02 | 28,12 | 41,07 | 69,34 | 106,17 | 138,27 | 133,39 |

On remarque que les valeurs d'ETP mensuelle supérieures aux valeurs de précipitations moyennes mensuelles à partir de mois de Mai jusqu'à Octobre.

De façon générale, les valeurs d'évapotranspiration potentielle deviennent plus faibles pendant les mois pluvieux qui débutent à partir du mois de Novembre et se terminent en Avril, soit 6 mois dans l'année. Les hauteurs d'évapotranspiration et de précipitation se rapprochent au mois de Mai.

Conclusion

L'étude des caractéristiques climatiques au niveau de notre zone d'étude a été élaborée en se basant sur une série de mesures correspondant à une période de 24 années d'observation (de 1960/1961 à 2013/2014).

L'étude réalisée dans ce chapitre montre que le bassin versant de l'Oued Rhumel-Boumerzoug exposé à un arrosage important correspondant à 524,13 mm de précipitation moyenne annuelle et que son climat est caractérisé par d'importantes irrégularités interannuelles.

Il ressort également de cette analyse climatique que le bassin versant étudié jouit de conditions relativement privilégiées, surtout en hiver et au printemps. La période humide est caractérisée par des températures très faibles par rapport à la température moyenne annuelle notamment pour le mois de Janvier, et des hauteurs de précipitations maximales observées surtout pour les mois de Décembre et Janvier.

En revanche, la période sèche est connue par la rareté des pluies surtout pour les mois de Juin, Juillet et Août, au cours desquels les températures atteignent leurs maxima.

Une forte évapotranspiration, marquent à partir de mois de Mai jusqu'à Octobre, les valeurs d'évapotranspiration potentielle deviennent plus faibles pendant les 6 mois pluvieux dans l'année qui débutent à partir du mois de Novembre et se terminent en Avril.

Toutes ces variations climatiques sont liées au caractère du climat méditerranéen subhumide de l'Afrique du Nord.

CHAPITRE IV

ANALYSE DE L'ÉCOULEMENT

FREQUENTIEL

Introduction

L'écoulement est la quantité d'eau des précipitations qui s'écoule sous de courant concentré dans le chevelu élémentaire de ruisseaux tout le long des versants et qui se concentre vers le cours d'eau principal.

La collecte des données représente l'étape fondamentale de toute recherche scientifique. Dans le cas de l'estimation de l'écoulement pluvial nous avons besoins des données sur la pluie maximale qui constituent le facteur essentiel dans la genèse du l'écoulement.

Le traitement des données nécessite pour déterminer les valeurs moyennes des caractéristiques pluviographiques pour chaque sous bassin.

Les valeurs de débit fréquentielle sont calculées à partir de la méthode la plus ancienne, évidemment c'est la condition d'application .L'estimation de débit dans une région sans vérification de la comptabilité avec les conditions de la validité des formules de temps de concentration.

De nombreuses formules proposées pour l'estimation du temps de concentration ont pour objectif de quantifier la pluie de courte durée. Ces formules nécessitent des conditions d'application préalable, comme les critères climatologiques et physiographiques qui ne sont pas toujours les mêmes.

Vue l'insuffisance de la donnée de débit maximale annuel pour les quatre sous bassin étudiés, on prend à titre d'exemple pour ce traitement de comparaison la station hydrométrique de Grarem (10 06 01) située à l'exutoire du bassin de l'Oued Rhumel-Boumerzoug. Les observations hydrométriques dont nous disposons sont celles des débits maximum journaliers d'une série de 26 années.

Le traitement de la donnée hydrométrique est basé essentiellement sur l'analyse grapho-analytique des dépendances et la méthode de Gumbel. L'analyse de la dépendance entre le débit fréquentiel calculé et observé permet de la comparaison entre les valeurs des débits choisie, et le débit calculé par la formule de temps de concentration le plus proche que le débit observé.

Les valeurs de l'écoulement d'une fréquence donnée est indépendant des facteurs zonaux.

IV.1.Collecte des données pluviométriques

La collecte des données pluviométriques s'est réalisée pour un certain nombre de stations pluviométriques situées à l'intérieure du bassin de la Rhumel-Boumerzoug et aussi dans les sous-bassins les plus proches. Le nombre total de ces stations est neuf (9), dont une trois station située à l'intérieure du bassin de la Rhumel-Boumerzoug et occupent la partie centrale et la partie sud. L'ensemble de toutes les stations à l'intérieure et à l'extérieure du bassin montre que celles-ci sont relativement réparties uniformément comme le montre la figure 19. [6]

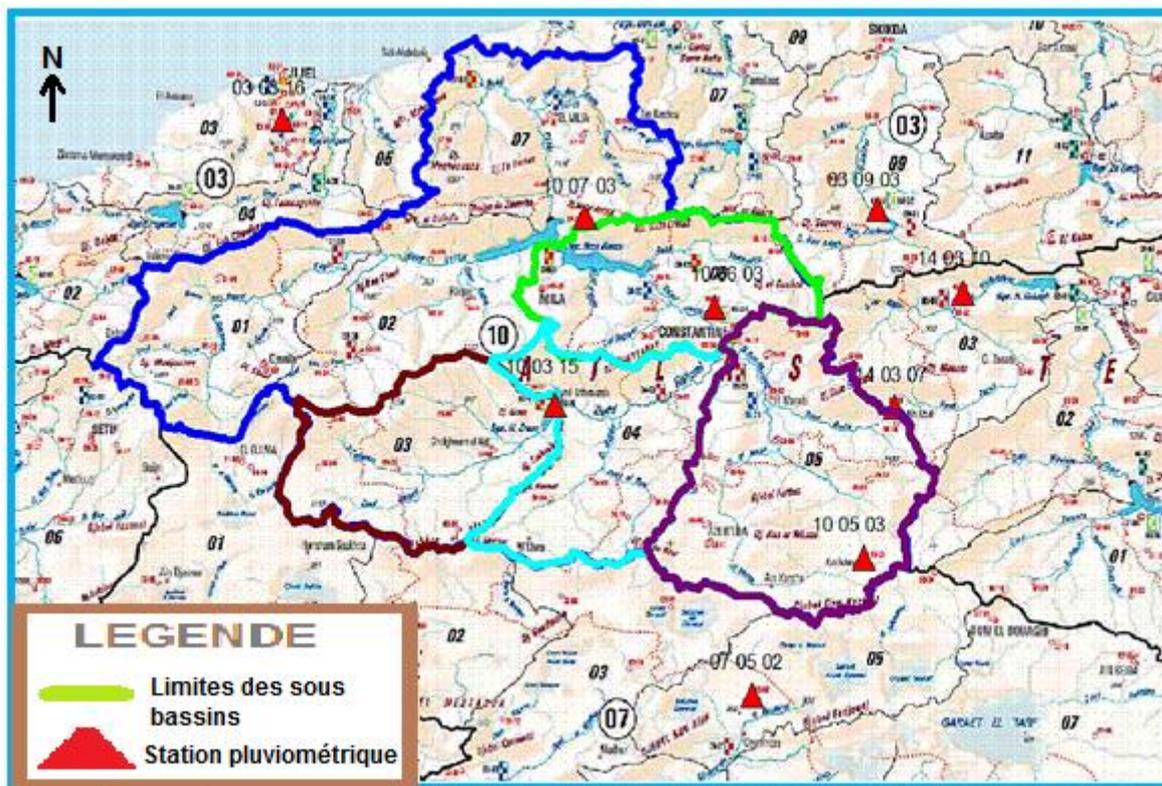


Figure 19 : Carte de la station pluviométrique de Rhumel-Boumerzoug.

IV.1.1. Analyse statistique :

Cette analyse a pour but de trouver la moyenne arithmétique, coefficient de variation et l'exposant climatique.

On a analysé neuf stations pluviométriques, trois stations à l'intérieur de bassin versant de Rhumel-Boumerzoug et six à l'extérieur de notre bassin versant. Dans ce chapitre on a pris la station de Hammam Grouz comme exemple.

Tableau 15 : Coordonné Lambert de station pluviométrique utilisée.

| Nom de la station | Code station | Coordonnées Lambert | | |
|-------------------|--------------|---------------------|-------|------|
| | | X(m) | Y(m) | Z(m) |
| HAMALA | 100703 | 826,05 | 369,7 | 660 |

IV.1.1.1. Calcule la moyenne arithmétique :

$$\bar{P}_{\max j} = \frac{\sum P_{\max j}}{n}$$

Où :

$\bar{P}_{\max j}$: La pluie maximale moyenne journalière.

P_{maxj} : La pluie maximale journalière.

n : Nombre d'années.

Tableau 16: La pluie maximale journalière P_{maxj} .

| Années | P_{maxj} |
|--------|------------|
| 1969 | 85 |
| 1970 | 87 |
| 1971 | 92 |
| 1972 | 56 |
| 1973 | 73,5 |
| 1974 | 47 |
| 1975 | 89,9 |
| 1976 | 59,1 |
| 1977 | 49,7 |
| 1978 | 55 |
| 1979 | 70,9 |
| 1980 | 61,5 |
| 1981 | 46,6 |
| 1982 | 90 |
| 1983 | 102 |
| 1984 | 159 |
| 1985 | 48,6 |
| 1986 | 54,4 |
| 1987 | 36,5 |
| 1988 | 82,5 |
| 1989 | 61 |
| 1990 | 62 |
| 1991 | 70,5 |
| 1992 | 85 |
| 1993 | 73,3 |
| 1994 | 58,3 |
| 1995 | 62,5 |

Donc :

$$\bar{P}_{maxj} = \frac{\sum P_{maxj}}{n} = \frac{1918,3}{27} = 71,05 \text{ mm}$$

IV.1.1.2. Calcul de coefficient de variation :

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{P}_{maxj}} ; \sigma = \sqrt{V} ; V = \frac{1}{n} \sum (P_i - \bar{P}_{maxj})^2$$

Ou :

C_V : Coefficient de variation,

σ : Ecart types,

V : Variance.

Tableau 17 : l'écart type et le coefficient de variations de la série d'observation.

| \bar{P}_{maxj} | V | σ | C_V |
|------------------|--------|----------|-------|
| 71,05 | 568,35 | 23,84 | 0,34 |

IV.1.1.3. Calcul de l'exposant climatique :

$$b = \frac{\ln\left(\frac{\bar{P}_{maxj}}{24}\right) - \ln 25}{\ln 24 - \ln 0,50} + 1 \quad [6]$$

$$b = \frac{\ln\left(\frac{\bar{P}_{maxj}}{24}\right) - \ln 25}{\ln 24 - \ln 0,50} + 1 = \frac{\ln\left(\frac{71,05}{24}\right) - \ln 25}{\ln 24 - \ln 0,50} + 1 = 0,45$$

La collecte des données pluviométriques s'est effectuée pour toutes les stations se trouvant à l'intérieur du bassin de Rhumel-Boumerzoug et des stations voisines à ce dernier.

Ces données sont insérées dans le tableau 18.

Tableau 18 : valeurs de \bar{P}_{maxj} , C_V et b .

| N° | Station | Code | X | Y | Z | \bar{P}_{maxj} | C_V | b |
|----|------------------|----------|--------|--------|-----|------------------|-------|------|
| 1 | Hamala | 10 07 03 | 826.05 | 369.70 | 660 | 71.05 | 0.34 | 0.45 |
| 2 | Ain Fekroune | 10 05 03 | 876.60 | 305.50 | 920 | 42.2 | 0.49 | 0.31 |
| 3 | Ain Abid | 14 03 07 | 907.25 | 366.12 | / | 47.6 | 0.48 | 0.35 |
| 4 | Ain El Arab | 14 03 10 | 924.61 | 367.84 | / | 55.1 | 0.36 | 0.38 |
| 5 | Barrage Zerdasas | 03 09 03 | 875.30 | 374.60 | 200 | 57.72 | 0.58 | 0.40 |
| 6 | Mrabett Moussa | 03 03 16 | 773.90 | 387.90 | 190 | 78.26 | 0.37 | 0.48 |
| 7 | Boulhilet | 07 05 02 | 858.40 | 277.55 | 859 | 26.56 | 0.489 | 0.19 |
| 8 | Hamma Bouziane | 10 06 03 | 848.50 | 352.8 | 460 | 44.22 | 0.27 | 0.33 |
| 9 | Hammam Grouz | 10 03 15 | 822.30 | 332 | 770 | 33.96 | 0.25 | 0.25 |

La construction de la carte de la pluie maximale moyenne journalière P_{maxj} , (fig.20) a permis de faire les constatations suivantes :

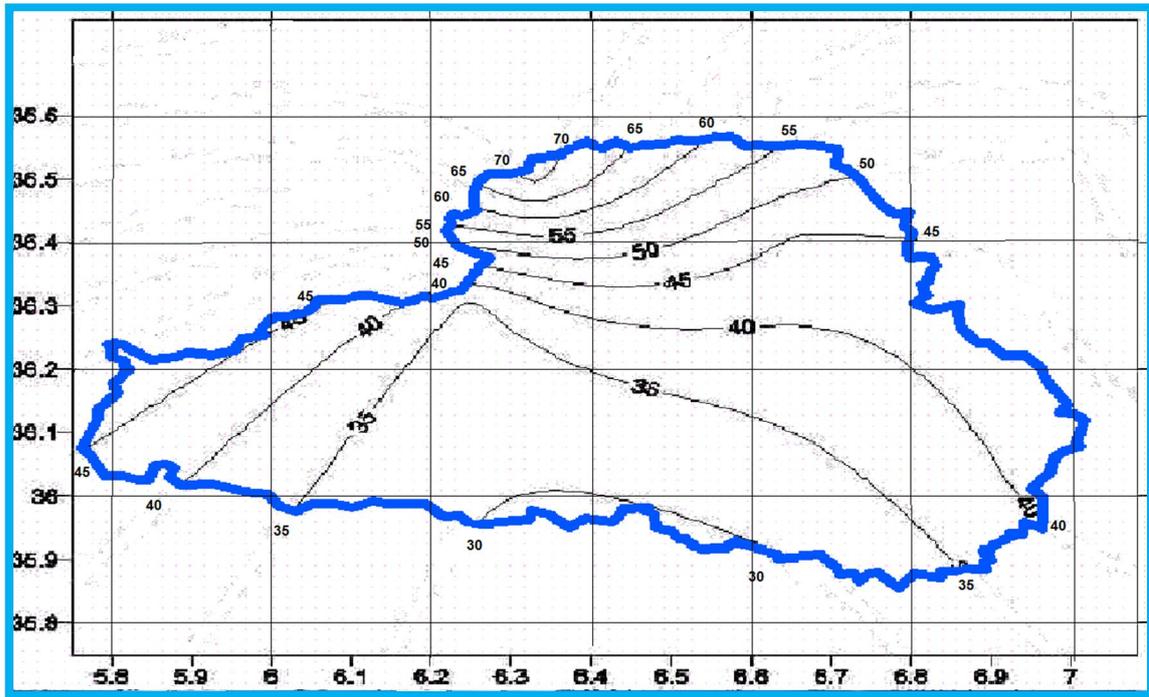


Figure 20 : Carte de la pluie maximale moyenne journalière \bar{P}_{maxj} du bassin versant de Rhumel-Boumerzoug.

1. les valeurs maxima occupent le Nord et le Nord-Ouest du bassin versant;
2. les pluies maxima diminuent vers le Sud du bassin. La pluie maximale dépasse 60 mm au nord du bassin et elle est inférieure à 30 mm à la limite sud du bassin.

Généralement, en zone humide de pluie abondante, la variation des différentes phases de la pluie est modérée, y compris la phase maximale. Par contre, en zone semi-aride la pluie maximale journalière se caractérise par une valeur du coefficient de variation très importante.

La construction de la carte du coefficient de variation de la pluie journalière maximale C_V (fig.21) a permis de faire les constatations suivantes:

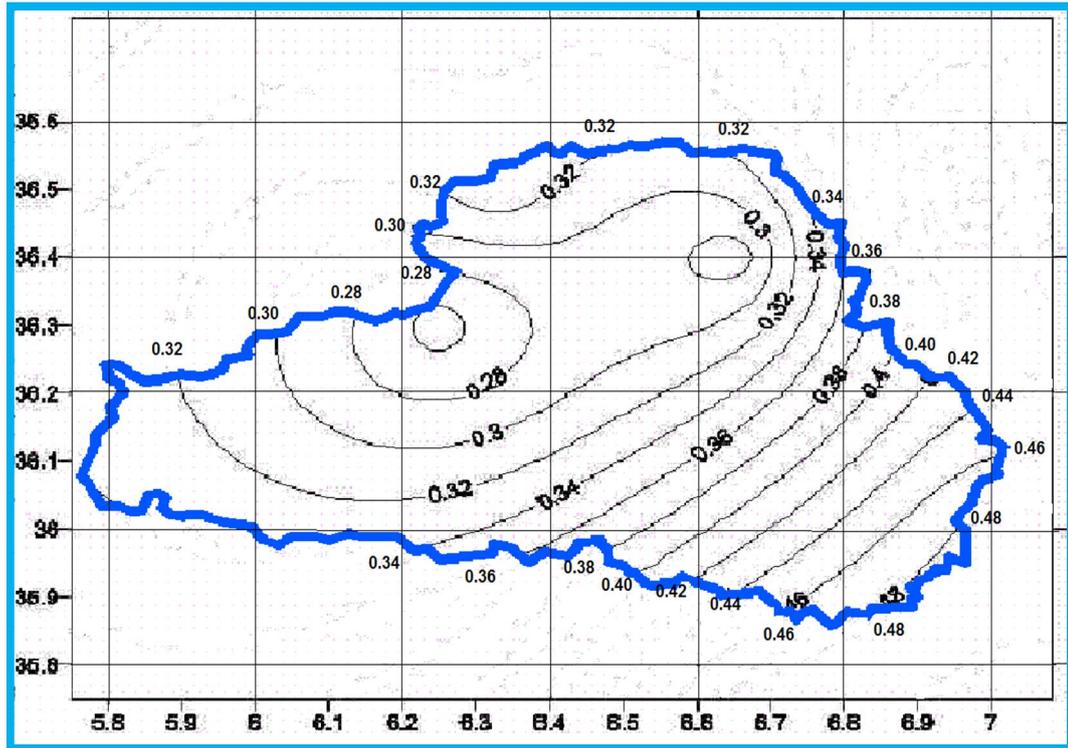


Figure 21 : Carte du coefficient de variation C_V des pluies maximales journalières du bassin versant de la Rhumel-Boumerzoug.

1. Les valeurs minima du coefficient de variation sont observées au centre du bassin versant, et sont de l'ordre de 0.28.
2. Les valeurs maxima du coefficient de variation sont concentrées sur la partie sud du bassin versant.
3. La valeur maximale du coefficient de variation a dépassé 0.46.
4. Il y a une tendance d'augmentation du Nord vers le Sud.

Comme tout facteur météorologique, la pluie maximale journalière reflète la spécificité climatique de la région. Par conséquent, la relation entre la pluie maximale journalière et la pluie maximale d'une durée inférieure à 24 heures- appelée pluie de courte durée- se traduit un exposant b appelé exposant climatique. Cet exposant est normalement soumis à la loi de continuité spatiale. D'où on peut le cartographier.

La construction de la carte du coefficient climatique de la pluie journalière maximale b (fig.22) a permis de faire les constatations suivantes :

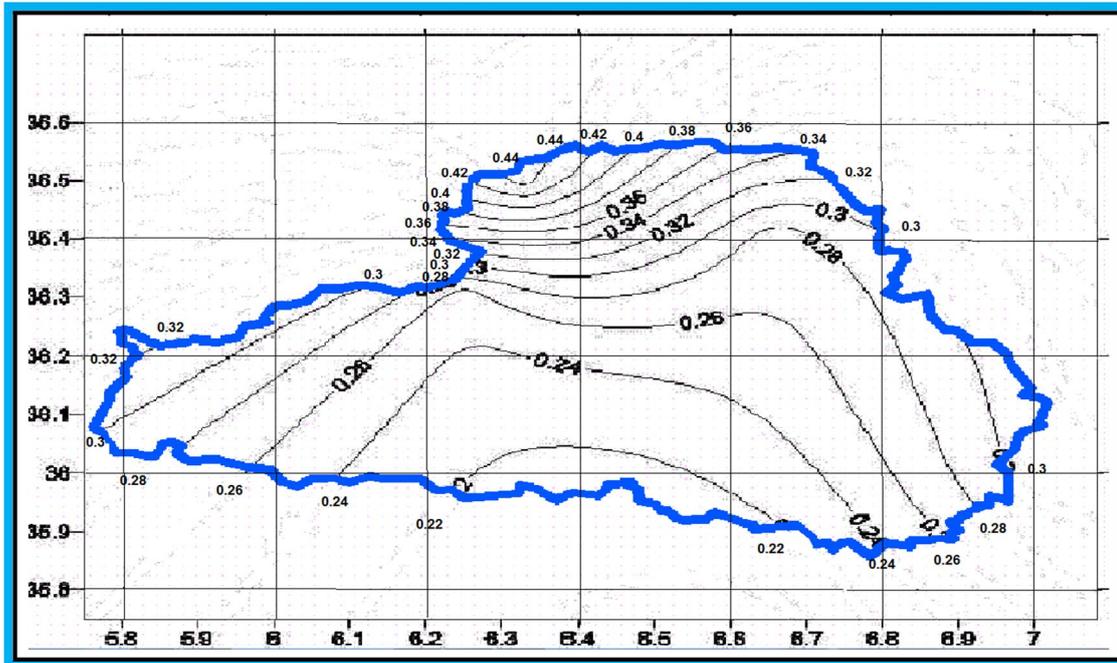


Figure 22 : Carte du coefficient climatique b des pluies maximales journalières du bassin versant de la Rhumel-Boumerzoug.

1. Les valeurs maxima du coefficient climatique sont observées au Nord et au Nord-Ouest du bassin versant, et varient de 0.42 à 0.44.
2. Les valeurs minima du coefficient climatique sont observées au Sud du bassin et sont de l'ordre de 0.22.

IV.2. Traitement des données pour chaque sous bassin

Le traitement des données pour chaque sous bassin tirées directement sur les carte (fig.20, fig.21 et fig.22) pour le centre de gravité hydrologique.

IV.2.1. Détermination de la pluie moyenne journalière maximale

La répartition spatiale de la pluie moyenne maximale journalière est exprimée sous forme de carte (fig.20). La détermination de la valeur de celle-ci pour un sous bassin donné consiste à tirer directement de la carte des $\bar{P}_{\max j}$ le point appelé centre de gravité hydrologique de ce dit bassin. Les valeurs de la pluie moyenne journalière maximale des sous bassins objet de l'étude se trouvent dans le tableau 19.

Tableau 19: Les valeurs des pluies journalières maximales moyennes.

| N° | Sous bassin | Code | $\bar{P}_{\max j}$ |
|----|----------------|-------|--------------------|
| 1 | Kebir Amont | 10 03 | 40 |
| 2 | Rhumel-Seguen | 10 04 | 32,5 |
| 3 | Boumerzoug | 10 05 | 38 |
| 4 | Rhumel-Smendou | 10 06 | 53 |

IV.2.2.Détermination du coefficient de variation

Les valeurs du coefficient de variation sont tirées directement de la carte (fig.21) pour le centre de gravité hydrologique. Les valeurs de coefficient de variation de la pluie journalière maximales moyenne des sous bassins de la Rhumel-Boumerzoug se trouvent dans le tableau 20.

Tableau 20 : Les valeurs de coefficient de variation des pluies journalière maximales moyenne.

| N° | Sous bassin | Code | C_v |
|----|----------------|-------|-------|
| 1 | Kebir Amont | 10 03 | 0.31 |
| 2 | Rhumel-Seguen | 10 04 | 0.33 |
| 3 | Boumerzoug | 10 05 | 0.39 |
| 4 | Rhumel-Smendou | 10 06 | 0.28 |

IV.2.3.Détermination du coefficient climatique

La valeur du coefficient climatique est aussi tirée directement de la carte (fig.22) par interpolation au centre de gravité hydrologique de chaque sous bassin. Les valeurs de l'exposant climatique b de la pluie journalière maximale moyenne des sous bassins de la Rhumel-Boumerzoug se trouvent dans le tableau 21.

Tableau 21 : Les valeurs de l'exposant climatique des pluies journalières maximales moyennes.

| N° | Sous bassin | Code | b |
|----|----------------|-------|------|
| 1 | Kebir Amont | 10 03 | 0.27 |
| 2 | Rhumel-Seguen | 10 04 | 0.24 |
| 3 | Boumerzoug | 10 05 | 0.26 |
| 4 | Rhumel-Smendou | 10 06 | 0.34 |

Les valeurs des caractéristiques pluviographiques des différents sous-bassins sont récapitulées dans le tableau 22.

Tableau 22 : Les données pluviographiques des sous bassin de la Rhumel-Boumerzoug.

| N° | Sous bassin | Code | $\bar{P}_{max j}$ | C_v | b |
|----|----------------|-------|-------------------|-------|------|
| 1 | Kebir Amont | 10 03 | 40 | 0.31 | 0.27 |
| 2 | Rhumel-Seguen | 10 04 | 32.5 | 0.33 | 0.23 |
| 3 | Boumerzoug | 10 05 | 38 | 0.39 | 0.26 |
| 4 | Rhumel-Smendou | 10 06 | 53 | 0.28 | 0.34 |

IV.3. Estimation de pluie maximum durant le temps de concentration

Généralement, les crues, durant toutes les saisons de l'année, sont provoquées par des pluies de courte durée. La variation temporaire de l'intensité de la pluie est mesurée par des pluviographes enregistreurs. L'événement pluvial se caractérise par une lame, une durée et une intensité moyenne (E , P_{tc} et I). Dans la pratique hydrologique, l'une des applications pour l'estimation de la pluie de courte durée, fait appel aux caractéristiques statistiques des pluies fortes, à savoir la pluie maximale moyenne journalière \bar{P}_{maxj} , le coefficient de variation de la pluie maximale journalière C_V . La durée de la pluie t , souvent prise égale au temps de concentration T_C .

IV.3.1. Pluie journalière maximale fréquentielle

La pluie journalière maximale, pour une fréquence quelconque, est définie par la formule suivante :

$$P_{jmax\ P\%} = \frac{\bar{P}_{maxj}}{\sqrt{C_V^2 + 1}} \times e^{u \sqrt{\ln C_V^2 + 1}} \quad [6]$$

Où :

$P_{jmax\ P\%}$: Pluie journalière maximale fréquentielle en (mm),

\bar{P}_{maxj} : La pluie maximale moyenne journalière (mm),

U : Variable de Gauss,

C_V : Coefficient de variation.

Tableau 23 : valeur de la pluie journalière maximale fréquentielle.

| Oued | Code | Pluie journalière maximale fréquentielle $P_{jmax\ p\%}$ | | | | | | |
|----------------|------|--|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| | | $P_{jmax0,1}$ | P_{jmax1} | P_{jmax2} | P_{jmax5} | P_{jmax10} | P_{jmax20} | P_{jmax50} |
| Rhumel Amont | 1003 | 97,12 | 77,39 | 71,18 | 62,9 | 56,34 | 49,29 | 38,21 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 82,02 | 64,67 | 59,26 | 52,07 | 46,4 | 40,35 | 30,91 |
| Boumerzoug | 1005 | 112,81 | 85,07 | 76,68 | 65,77 | 57,35 | 48,58 | 35,4 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 118,95 | 96,8 | 89,73 | 80,22 | 72,59 | 64,3 | 51,04 |

IV.3.2. Le temps de concentration

La notion du temps de concentration reste problématique. Pour certains, le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe à un point élevée du bassin versant, pour atteindre l'exutoire. Bien qu'il soit probable que cette goutte pourrait ne jamais arriver à l'exutoire.

De point de vue hydrologique, le temps de concentration est la durée que met une phase hydrologique pour parcourir un tronçon du cours d'eau d'une longueur donnée. Souvent, cette longueur est comparable à la longueur du cours d'eau.

Bien sûr, quand il est question des débits maxima des crues, le temps de concentration est la durée que met un débit maximum, généré sur le bassin versant, pour arriver à l'exutoire. Il s'agit alors du temps de propagation de la crue tout le long du cours d'eau.

Vu l'absence de la méthode appropriées, développées dans les conditions physico-géographique du Nord de l'Algérie, pour l'estimation de cette caractéristique indispensable dans les calculs d'estimation des crues, alors on se contente des formules courantes dans la pratique hydrologique en Algérie.

On a choisi trois formules pour calculer le temps de concentration : Formule de Giandotti, Formule de Sogreah et formule de Boutaoutaou, le tableau suivant résume les valeurs de temps de concentration.

Tableau 24 : Temps de concentration en estimé par différentes formules.

| Oued | Code | $T_c(h)$ Giandotti | $T_c(h)$ Sogreah | $T_c(h)$ Boutaoutaou |
|----------------|------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
| Rhumel Amant | 1003 | 14,13 | 17,78 | 13,45 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 15,55 | 22,11 | 15,90 |
| Boumerzoug | 1005 | 18,15 | 22,14 | 14,47 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 13,65 | 19,63 | 14,41 |

IV.3.3. Estimation des pluies de courte durée :

L'ordonnée maximale d'une crue est générée par la partie centrale d'une averse dont la durée est comparable au temps de concentration. C'est la raison pour laquelle on s'intéresse à la détermination de la lame de pluie de courte durée.

Dans la pratique hydrologique, cette quantité de la pluie est calculée par la formule suivante [Documentation ANRH, Reniemeras] :

$$P_{t_c, P\%} = P_{j_{\max P\%}} \times \left(\frac{T_c}{24}\right)^b \quad [6]$$

Où :

$P_{j_{\max P\%}}$: Pluie journalière maximale d'une fréquence donnée en (mm),

T_c : Temps de concentration en heure,

b : exposant climatique.

Tableau 25 : valeur de la pluie de courte durée d'après le temps de concentration de Giandotti.

| | | La pluie pendant un temps de concentration | | | | | | |
|----------------|------|--|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Oued | Code | $P_{t_c,0,1\%}$ | $P_{t_c,1\%}$ | $P_{t_c,2\%}$ | $P_{t_c,5\%}$ | $P_{t_c,10\%}$ | $P_{t_c,20\%}$ | $P_{t_c,50\%}$ |
| Rhumel Amont | 1003 | 86,38 | 71,76 | 71,18 | 58,33 | 52,24 | 45,71 | 35,43 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 72,61 | 57,25 | 59,26 | 46,10 | 41,08 | 35,72 | 27,36 |
| Boumerzoug | 1005 | 97,69 | 76,16 | 58,88 | 68,65 | 58,88 | 43,49 | 31,69 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 98,46 | 88,15 | 81,72 | 73,05 | 66,10 | 58,56 | 46,48 |

Tableau26 : valeur de la pluie de courte durée d'après le temps de concentration de Sogreah.

| | | La pluie pendant un temps de concentration $P_{t_c,P\%}$ | | | | | | |
|----------------|------|--|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Oued | Code | $P_{t_c,0,1\%}$ | $P_{t_c,1\%}$ | $P_{t_c,2\%}$ | $P_{t_c,5\%}$ | $P_{t_c,10\%}$ | $P_{t_c,20\%}$ | $P_{t_c,50\%}$ |
| Rhumel Amont | 1003 | 95,03 | 75,71 | 71,18 | 61,54 | 55,12 | 48,23 | 37,38 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 76,55 | 60,36 | 59,26 | 48,60 | 43,30 | 37,66 | 28,85 |
| Boumerzoug | 1005 | 110,47 | 83,31 | 64,40 | 64,40 | 56,16 | 47,57 | 34,67 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 111,20 | 90,50 | 83,89 | 74,99 | 67,86 | 60,11 | 47,71 |

Tableau 27: valeur de la pluie de courte durée d'après le temps de concentration de Boutaoutaou.

| | | La pluie pendant un temps de concentration $P_{t_c,P\%}$ | | | | | | |
|---------------|------|--|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Oued | Code | $P_{t_c,0,1\%}$ | $P_{t_c,1\%}$ | $P_{t_c,2\%}$ | $P_{t_c,5\%}$ | $P_{t_c,10\%}$ | $P_{t_c,20\%}$ | $P_{t_c,50\%}$ |
| Rhumel Amont | 1003 | 84,72 | 67,50 | 71,18 | 54,87 | 49,14 | 43,00 | 33,33 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 71,80 | 56,61 | 59,26 | 45,58 | 40,61 | 35,32 | 27,05 |
| Boumerzoug | 1005 | 101,57 | 76,59 | 59,21 | 59,21 | 51,63 | 43,74 | 31,87 |
| Smendou | 1006 | 100,26 | 81,59 | 75,64 | 67,62 | 61,18 | 54,20 | 43,02 |

IV.4. Calcul de coefficient de l'écoulement

Le coefficient de l'écoulement C_r a été déterminé à partir des données des plus grandes crues (crues de faibles fréquences), enregistrée dans des cours d'eau de différentes régions :

$$C_r = 1 - \text{EXP} \left(- \frac{P_{j\text{max}p\%}}{P_0} \right) \quad [4]$$

Où :

C_r : Coefficient de l'écoulement.

$P_{jmax p\%}$: Pluie journalière maximale d'une fréquence donnée en (mm),

P_0 : Perte maximale total, pour le bassin de Kebir-Rhumel égale à 120(mm).

D'après la formule de Boutaoutaou on doit calculer les valeurs de coefficient du l'écoulement .Les valeurs sont représentées dans le tableau suivants.

Tableau28 : Valeurs de coefficient de l'écoulement.

| Oueds | Code | Coefficient de l'écoulement C_r | | | | | | |
|----------------|------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 0,1% | 1% | 2% | 5% | 10% | 20% | 50% |
| Rhumel Amant | 1003 | 0,55 | 0,48 | 0,45 | 0,41 | 0,37 | 0,34 | 0,27 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 0,50 | 0,42 | 0,39 | 0,35 | 0,32 | 0,29 | 0,23 |
| Boumerzoug | 1005 | 0,61 | 0,51 | 0,47 | 0,42 | 0,38 | 0,33 | 0,26 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 0,63 | 0,55 | 0,53 | 0,49 | 0,45 | 0,41 | 0,35 |

IV.5. Calcule de l'intensité de l'écoulement

$$I_{P\%} = P_{tcp\%}/T_c \quad [6]$$

Où :

$I_{P\%}$: Intensité de l'écoulement en (mm/h),

$P_{tcp\%}$: Pluie de courte durée (mm),

T_c : Temps de concentration en heure.

Tableau 29: Les valeurs de l'intensité de l'écoulement d'après la formule de Giandotti.

| Oued | Code | Intensité de la pluie $I_{P\%}$ (mm/h) | | | | | | |
|----------------|------|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | | $I_{0,1\%}$ | $I_{1\%}$ | $I_{2\%}$ | $I_{5\%}$ | $I_{10\%}$ | $I_{20\%}$ | $I_{50\%}$ |
| Rhumel Amant | 1003 | 4,76 | 3,95 | 3,92 | 3,21 | 2,88 | 2,52 | 1,95 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 5,14 | 4,05 | 4,19 | 3,26 | 2,91 | 2,53 | 1,94 |
| Boumerzoug | 1005 | 6,28 | 4,90 | 3,79 | 3,79 | 3,30 | 2,80 | 2,04 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 7.21 | 5.87 | 5.44 | 4.86 | 4.4 | 3.89 | 3.09 |

Tableau30 : Les valeurs de l'intensité de l'écoulement d'après la formule de Sogreah.

| | | Intensité de la pluie $I_{P\%}$ (mm/h) | | | | | | |
|----------------|------|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $I_{0,1\%}$ | $I_{1\%}$ | $I_{2\%}$ | $I_{5\%}$ | $I_{10\%}$ | $I_{20\%}$ | $I_{50\%}$ |
| Rhumel Amant | 1003 | 4,29 | 3,42 | 3,22 | 2,78 | 2,49 | 2,18 | 1,69 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 4,31 | 3,40 | 3,33 | 2,73 | 2,44 | 2,12 | 1,62 |
| Boumerzoug | 1005 | 5,00 | 3,77 | 2,91 | 2,91 | 2,54 | 2,15 | 1,57 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 5,67 | 4,61 | 4,27 | 3,82 | 3,46 | 3,06 | 2,43 |

Tableau31 : Les valeurs de l'intensité de l'écoulement d'après la formule de Boutaoutaou.

| | | Intensité de la pluie $I_{P\%}$ (mm/h) | | | | | | |
|----------------|------|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $I_{0,1\%}$ | $I_{1\%}$ | $I_{2\%}$ | $I_{5\%}$ | $I_{10\%}$ | $I_{20\%}$ | $I_{50\%}$ |
| Rhumel-Amant | 1003 | 6,39 | 4,82 | 3,72 | 3,72 | 3,25 | 2,75 | 2,00 |
| Rhumel-Seguen | 1004 | 5,34 | 4,21 | 4,41 | 3,39 | 3,02 | 2,63 | 2,01 |
| Boumerzoug | 1005 | 6,39 | 4,82 | 3,72 | 3,72 | 3,25 | 2,75 | 2,00 |
| Rhumel-Smendou | 1006 | 6,96 | 5,66 | 5,25 | 4,69 | 4,25 | 3,76 | 2,99 |

IV.6.Estimation de la valeur de débit fréquentiel

Il y'a plusieurs méthode d'estimer le débit fréquentielle. Dans notre étude on a choisir la méthode rational :

$$Q_{P\%} = C_r \times I_{P\%} \times A \quad [11]$$

Où :

$Q_{P\%}$: Débit fréquentielle en (m^3 /s),

C_r : Coefficient de l'écoulement,

$I_{P\%}$: Intensité de la pluie (mm/h),

A : La surface de sous bassin en km^2 .

D'après les valeurs de l'intensité de pluies qui varient selon le temps de concentration et la fréquence de temps de retour on à calcule les débits fréquentielles, les valeurs qui correspondent sont représentées dans les tableaux en dessous.

Tableau32 : le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Giandotti.

| | | le débit fréquentiel $Q_{P\%}$ | | | | | | |
|----------------|------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $Q_{0,1\%}$ | $Q_{1\%}$ | $Q_{2\%}$ | $Q_{5\%}$ | $Q_{10\%}$ | $Q_{20\%}$ | $Q_{50\%}$ |
| Rhumel Amant | 1003 | 931.64 | 635.83 | 550.56 | 443.65 | 364.60 | 287.05 | 180.10 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 821.86 | 545.24 | 467.29 | 370.93 | 301.07 | 233.12 | 142.02 |
| Boumerzoug | 1005 | 2055.34 | 1291.62 | 1082.48 | 829.65 | 651.40 | 483.53 | 270.40 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 1363.02 | 976.69 | 861.09 | 712.67 | 600.32 | 486.09 | 322.19 |

Tableau 33 : le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Sogreah.

| | | le débit fréquentiel $Q_{P\%}$ | | | | | | |
|----------------|------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $Q_{0,1\%}$ | $Q_{1\%}$ | $Q_{2\%}$ | $Q_{5\%}$ | $Q_{10\%}$ | $Q_{20\%}$ | $Q_{50\%}$ |
| Rhumel Amant | 1003 | 805,88 | 550,00 | 486,76 | 383,77 | 315,64 | 248,30 | 155,79 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 688,82 | 456,98 | 419,64 | 310,89 | 252,34 | 195,39 | 119,03 |
| Boumerzoug | 1005 | 1581,57 | 993,89 | 714,42 | 638,39 | 501,25 | 372,07 | 208,08 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 1070,79 | 767,16 | 676,36 | 559,78 | 471,53 | 381,81 | 253,08 |

Tableau 34 : le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Boutaoutaou.

| | | le débit fréquentiel $Q_{P\%}$ | | | | | | |
|----------------|------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $Q_{0,1\%}$ | $Q_{1\%}$ | $Q_{2\%}$ | $Q_{5\%}$ | $Q_{10\%}$ | $Q_{20\%}$ | $Q_{50\%}$ |
| Rhumel Amant | 1003 | 1099,28 | 750,24 | 744,76 | 523,48 | 430,56 | 338,70 | 212,51 |
| Rhumel Seguen | 1004 | 853,88 | 566,49 | 554,67 | 385,38 | 312,80 | 242,21 | 147,55 |
| Boumerzoug | 1005 | 2021,72 | 1270,50 | 913,24 | 816,05 | 640,75 | 475,62 | 265,98 |
| Rhumel Smendou | 1006 | 1315,13 | 942,22 | 830,69 | 687,52 | 579,13 | 468,94 | 310,82 |

D'après la comparaison entre les trois tableaux de débit fréquentiel, Nous avons remarqué une fluctuation claire. Pour cela, nous avons proposé une analyse fréquentielle des débits maximal annuelle, en prend à titre l'exemple la station hydrométrique de Smendou avec le code 10 06 01.

IV.7 .Analyse fréquentielle des débits maxima annuels

Après l'analyse préliminaire des séries des débits maxima instantanés, nous avons obtenu une de série de la taille varie de 26 années pour l'Oued Smendou (station de Grarem 10 06 01).

Il existe plusieurs méthodes pour le traitement statistique des données hydrométéorologiques, telles que la méthode des moments, la méthode de maximum vraisemblance, les méthodes grapho-analytiques et la méthode de Gumbel. Chaque méthode a ses insuffisances.

La méthode analytique la plus simple est celle des moments; néanmoins elle exige des séries suffisamment longues et qui, quelle que soit leur taille, ne peut être satisfaisante quand il s'agit de l'estimation de coefficient d'asymétrie. C'est la raison qui nous oblige à chercher une autre méthode qui tient compte au préalable du choix de coefficient d'asymétrie. Cette exigence s'avère possible avec la méthode grapho-analytique d'Alekseev ou de Gumbel.

Ayant une série d'observations $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, on construit la courbe empirique des fréquences sur un quadrillage statistique approprié et après un lissage à main levée de cette courbe, on tire de celle-ci les trois quantiles standards : $X_{P_1=100-P_2}$, $X_{50\%}$ et $X_{P_2=100-P_1}$.

Dans le cas de l'application de la méthode d'Alekseev, les valeurs des fréquences rares sont égales à $P_1 = 5\%$ et $P_2 = 95$. [6]

IV.7.1 La méthode grapho-analytique d'Alekseev.

Le traitement statistique des débits maximum a pour objet l'estimation des paramètres suivants : le débit maximum moyen, le coefficient de variation et le coefficient d'asymétrie qui sont indispensables pour le lissage des courbes empiriques et son extrapolation. Mais l'insuffisance des données rend difficile le choix de cette loi théorique.

Alors, la préférence est donnée à la méthode grapho-analytique, appelée aussi méthode des quantiles, qui permet l'estimation de ces paramètres sans exiger de grande séries. Cette méthode donne la possibilité de tenir compte de l'asymétrie de la courbe des fréquences, en choisissant trois quantiles, c'est-à-dire trois points caractéristiques tirés de cette courbe lissée. [6]

Les paramètres statistiques sont estimés à l'aide de trois points caractéristiques tirés de la courbe empirique lissée, correspondants aux fréquences 5 %, 50% et 95%. A titre d'exemple, on construit la courbe empirique des fréquences de l'oued Smendou (figure 23).

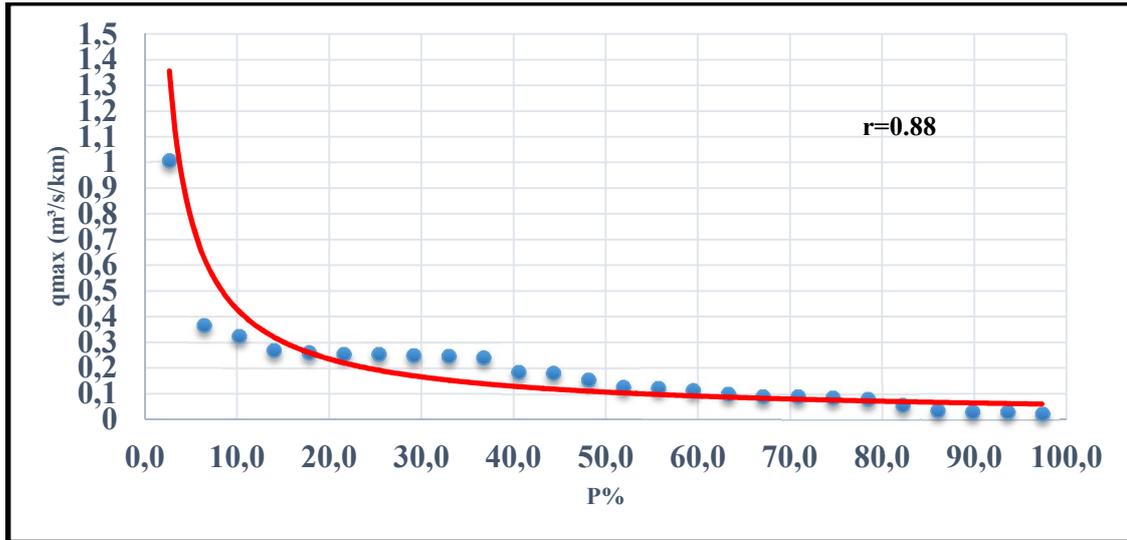


Figure 23 : Courbe empirique de l'oued Smendou (10.06.01).

Après avoir tiré les quantiles $q_{5\%}$, $q_{50\%}$ et $q_{95\%}$, on calcule le coefficient de courbure S :

$$S = \frac{q_{5\%} + q_{95\%} - 2q_{50\%}}{q_{5\%} - q_{95\%}} \quad [6]$$

A cette valeur calculée de S correspond une valeur du coefficient d'asymétrie C_S qu'on tire dans un tableau spécial (tableau 37).

L'écart quadratique type est exprimé par : $\sigma_q = \frac{q_{5\%} - q_{95\%}}{\Phi_{5\%} - \Phi_{95\%}} \quad [6]$

et la valeur moyenne est exprimé par : $q_0 = q_{50\%} - \sigma_q \times \Phi_{50\%} \quad [6]$

Où :

$\Phi_{5\%}$, $\Phi_{50\%}$ et $\Phi_{95\%}$: écarts relatifs de l'unité de la courbe binomiale des fréquences pour un coefficient de variation C_V égal à l'unité et pour un coefficient d'asymétrie C_S donné.

Le coefficient de variation s'écrit : $C_V = \frac{\sigma_q}{q_0} \quad [6]$

Les valeurs des quantiles tirés des courbes empiriques lissées sont insérées dans le tableau 35.

Tableau 35: Les valeurs des quantiles.

| Nom d'Oued et station | Code | $q_{5\%}$ | $q_{50\%}$ | $q_{95\%}$ |
|-----------------------|----------|-----------|------------|------------|
| Oued Smendou-Grarem | 10.06.01 | 0,45 | 0,11 | 0,04 |

Les valeurs des caractéristiques statistiques estimées par la méthode grapho-analytique d'Alekseev sont insérées dans le tableau 36.

Tableau 36 : les valeurs des caractéristiques statistiques.

| Nom d'Oued et station | Code | q_0 (m ³ /S/Km ²) | C_V | C_S |
|-----------------------|----------|--|-------|-------|
| Oued Smendou-Grarem | 10.06.01 | 0,16 | 0,90 | 2,37 |

Tableau 37: Estimation du coefficient d'asymétrie.

| Nom d'Oued et station | Code | S | C_V | C_S |
|-----------------------|----------|------|-------|-------|
| Oued Smendou-Grarem | 10.06.01 | 0,66 | 0,9 | 2,37 |

IV.7.1.1. Estimation de la valeur de débit spécifique fréquentielle

L'étude du ruissellement pluvial doit être réalisée pour des différentes fréquences rares. Vu l'interdépendance entre les éléments d'un hydrogramme, la détermination du ruissellement est possible si on dispose des principales caractéristiques de celui-ci, et particulièrement de débit maximum. On propose d'utiliser les fréquences suivantes: 0.1%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% et 50% qui couvrent le domaine des fréquences rares les plus utilisées dans la pratique de l'ingénieur.

Connaissant les caractéristiques statistiques pour oued : la moyenne q_0 , le coefficient de variation C_V et le coefficient d'asymétrie C_S :

- On tire à partir du tableau Foster Rebkin, la valeur du nombre Foster Rebkin $F_{P\%}$ pour chaque fréquence qui correspond à la valeur de coefficient d'asymétrie C_S donné.
- On calcule le coefficient modulaire $K_{P\%}$ qui est exprimé par la formule suivantes:

$$K_{P\%} = (F_{P\%} \times C_V) + 1 \quad [6]$$

- On calcule le débit spécifique maximale fréquentielle par la formule suivante :

$$q_{P\%} = K_{P\%} q_0 \quad [6]$$

q_0 : Débit maximum moyen spécifique.

Tableau 38: Valeurs des débits spécifiques maxima pour le sous bassin de l'oued. Smendou (code 10 06 01).

| $P_{\%}$ | 0,1% | 1% | 2% | 5% | 10% | 20% | 50% |
|-----------|------|------|------|------|------|------|-------|
| $F_{P\%}$ | 6,26 | 3,73 | 3,15 | 2,01 | 1,26 | 0,55 | -0,34 |
| $K_{P\%}$ | 6,66 | 4,37 | 3,85 | 2,81 | 2,14 | 1,5 | 0,69 |
| $q_{P\%}$ | 1,07 | 0,7 | 0,62 | 0,45 | 0,34 | 0,24 | 0,11 |

Les valeurs du débit maxima fréquentielles pour les sous bassins versants sont récapitulées dans le tableau 39 :

Tableau 39 : valeur des débits spécifique maximale du bassin versant de la Smendou.

| Nom d'Oued et station | Code | Débit spécifique maximale fréquentiel observé (Aleksseev) $q_{p\%}$ ($m^3/s/K^2$) | | | | | | |
|-----------------------|----------|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| | | $q_{0,1\%}$ | $q_{1\%}$ | $q_{2\%}$ | $q_{5\%}$ | $q_{10\%}$ | $q_{20\%}$ | $q_{50\%}$ |
| Oued Smendou-Grarem | 10.06.01 | 1153,1 | 757,4 | 666,6 | 488,0 | 370,6 | 259,4 | 120,0 |

IV.7.2. La méthode de Gumbel ou double exponentiel

La loi de Gumbel est souvent utilisée pour ajuster les séries des valeurs maximum (extrême) tel que le débit et la pluie maximale. La droite de la distribution dépend de la pente (b) et l'autre paramètre (a) qui représente le point d'intersection de cette droite avec l'axe des coordonnées qu'on cherche à déduire.

Cette droite d'ajustement s'écrit par la formule suivante :

$$X_i = a + bU_i \quad [13]$$

Où :

U_i : variable réduite de Gumbel,

a et b : les paramètres du modèle de Gumbel.

La détermination de (a) et (b) peut réaliser graphiquement ou par l'utilisation de la méthode du moment.

On commence par un tri de la série de débit spécifique maximal annuel par les valeurs croissantes permettant d'associer à chaque valeur son rang (r). La simulation a montré que pour la loi de Gumbel, il faut utiliser la fréquence empirique de Hazen :

$$F(X_r) = \frac{r-0,5}{n} \quad [13]$$

n : La taille de l'échantillon dans notre cas n=26

Le temps de retour de l'évènement peut s'écrit par la formule suivante :

$$T = \frac{1}{1 - F(X_i)} \quad [13]$$

Calcule la variable réduite $U_i = -\ln(-\ln(F(X_i)))$ pour chaque rang.

En fin en trace la droite de la couple (U_i, X_i).

IV.7 .2.1 Calcul des paramètres de l'ajustement de la loi de GUMBEL :

La droite de GUMBEL est donnée par la formule :

$$X_i = a + bU_i$$

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

$$a = \bar{X} - b\gamma$$

σ : L'écart de l'échantillon=0.188,

$\gamma = 0.5772$ (constant d'Euler),

\bar{X} : La moyenne de l'échantillon=0,191 $m^3/s/km^2$.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{26} (X_i - 0.191)^2}{26}} = 0.188$$

Donc $b=0.146$ et le $a=0.106$

Les deux valeurs de (a) et (b) calculés c'est presque analogue à celui qui est représenté dans la courbe de la droite.

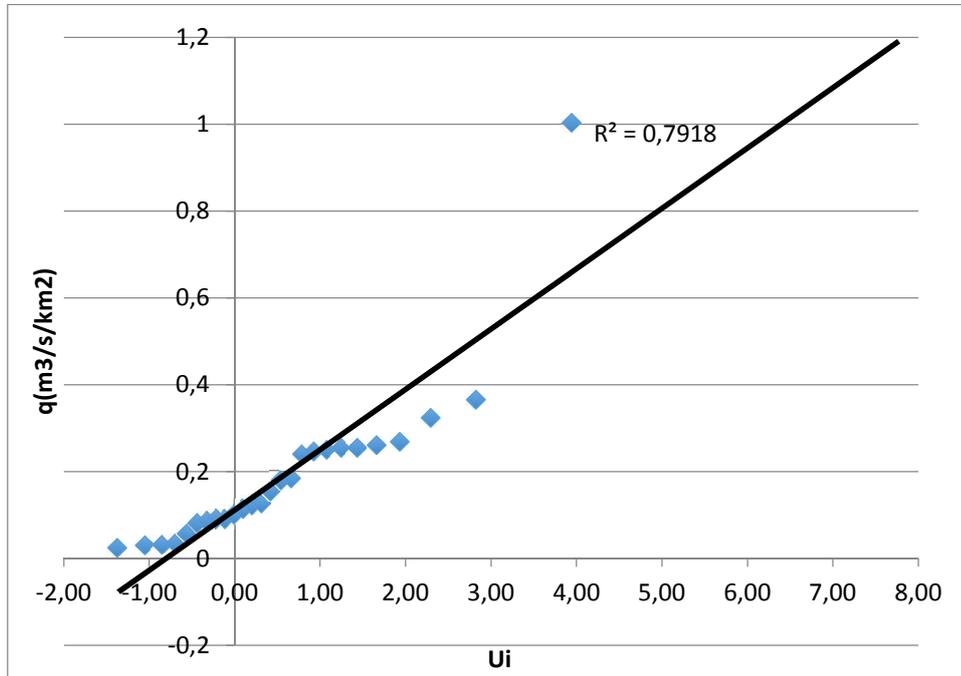


Figure 24- ajustement par la loi du Gumbel de l'oued Smendou (10.06.01).

On voit que $r = 0.88 > 0.8$, donc la corrélation est acceptable donc notre droite est représentative.

L'équation du coefficient de corrélation s'écrit par la formule suivante :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{26} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{26} (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{26} (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

D'après l'analyse statistique de la série de débit spécifique maximale je constate ce qui suit :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{26} (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{26} (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^{26} (Y_i - \bar{Y})^2}} = \frac{5.352}{\sqrt{0.925 * 39.10}} = 0.889$$

IV.8.Vérification des méthodes d'estimation de débit maximum fréquentiel

La vérification de ces méthodes basées sur la comparaison entre les valeurs calculées par les formules empirique et celle observé, les deux tableaux suivant représenté la récapitulation de ces valeurs.

Tableau 40 : récapitulation de débit maximum fréquentiel par les formules empirique.

| | | Débit maximum fréquentiel $Q_{P\%}(m^3/S)$ | | | | | | |
|-------------------|-------------|--|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Formules | Sous bassin | $Q_{0,1\%}$ | $Q_{1\%}$ | $Q_{2\%}$ | $Q_{5\%}$ | $Q_{10\%}$ | $Q_{20\%}$ | $Q_{50\%}$ |
| Boutaotaou | 10 06 01 | 1315,1 | 942,2 | 831 | 687,5 | 579 | 469 | 311 |
| Giandotti | 10 06 01 | 1363.02 | 976.69 | 861.09 | 712.67 | 600.32 | 486.09 | 322.2 |
| Sogreah | 10 06 01 | 1070,8 | 767,2 | 676 | 559,8 | 472 | 382 | 253 |

Tableau 41 : récapitulation de débit maximum fréquentiel observé

| | | Débit maximum fréquentiel $Q_{P\%} (m^3/s)$ | | | | | | |
|------------------|-------------|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| loi d'ajustement | sous bassin | $Q_{0,1\%}$ | $Q_{1\%}$ | $Q_{2\%}$ | $Q_{5\%}$ | $Q_{10\%}$ | $Q_{20\%}$ | $Q_{50\%}$ |
| Alekseev | 10 06 01 | 1153,64 | 757,41 | 666,57 | 488,04 | 370,58 | 259,39 | 120 |
| Gumbel | 10 06 01 | 1189,1 | 810,75 | 702,65 | 562,12 | 486,45 | 378,35 | 216,2 |

En prenant l'éloignement de ces droites de tendance par rapport à la première bissectrice. La convergence de la droite vers la première bissectrice représente la diminution des écarts ce qui nous donne une certaine compatibilité de ces valeurs.

Si on considère que les valeurs observées à une certaine crédibilité dans la mesure, on adopte que la convergence a cette limite nous donne la validation de la

formule empirique. Pour faire cette comparaison on utilise la dépendance entre les valeurs calculées par les formules de Boutaoutaou, Giandotti et Sogreah en fonction des valeurs observées estimées par la méthode d'Alekseev et Gumbel.

Légende :

| | | |
|--|---|--|
| | Droite de la formule : Boutaoutaou=f(Alekseev), f(Gumbel) | |
| | Droite de la formule : Giandotti=f(Alekseev),f (Gumbel) | |
| | Droite de la formule : Sogreah=f(Alekseev), f(Gumbel) | |
| | Droite de la première bissectrice | |

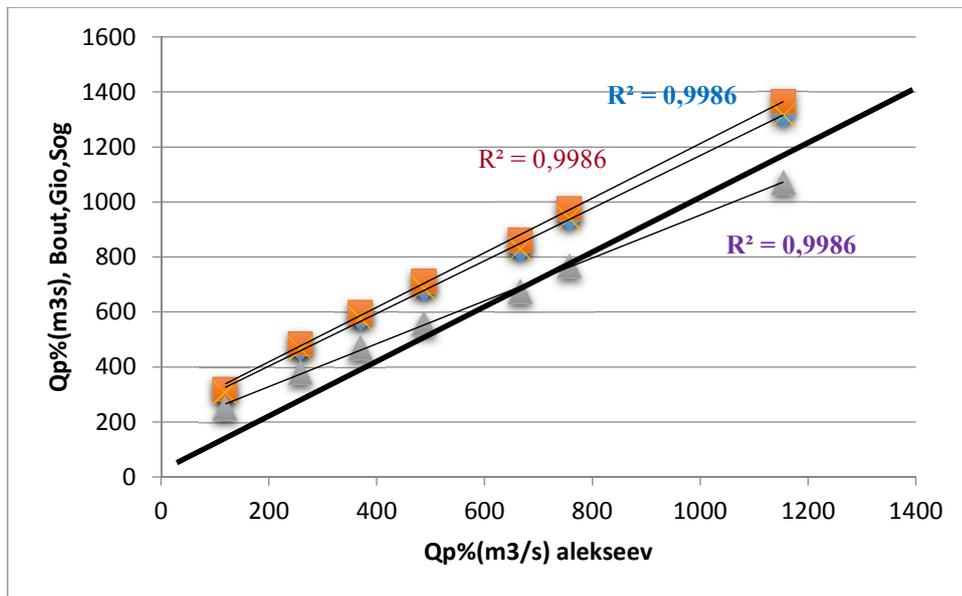


Figure 25 : dépendance de : bout, Gia, Sog=f(Alekseev).

A partir de la figure 25 on constate que les valeurs provenant de l'équation de Sogreah sont plus convergent vers la première bissectrice. Mais les valeurs de la tendance de la formule Giandotti et Boutaoutaou sont égales et horizontale à la première bissectrice.

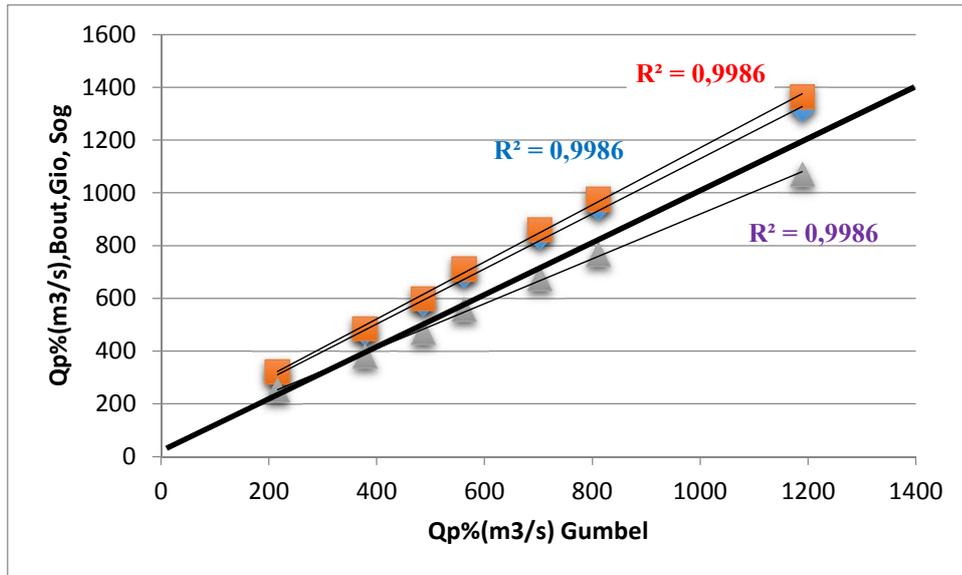


Figure 26 : dépendance de : bout, Gia, Sog=f(Gumbel).

La même constatation pour la figure 26, mais il y a une grande convergence a la première bissectrice par rapport au graphe précédent.

IV.9. Cartographie de l'écoulement pluvial des sous-bassins d'Oued Rhumel-Boumerzoug

D'après l'analyse statistique des débits maximum effectué précédemment ; on va cartographier l'écoulement de ce bassin en prenant les valeurs des débits calculées par la formule de Sogreah qui sont plus proche aux valeurs observées.

Tableau 42: le débit fréquentiel d'après le temps de concentration de Sogreah.

| | | le débit fréquentiel $Q_{p\%}$ (m3/s) | | | | | | |
|----------------|-------|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $Q_{0,1\%}$ | $Q_{1\%}$ | $Q_{2\%}$ | $Q_{5\%}$ | $Q_{10\%}$ | $Q_{20\%}$ | $Q_{50\%}$ |
| Rhumel Amont | 10 03 | 805,88 | 550,00 | 486,76 | 383,77 | 315,64 | 248,30 | 155,79 |
| Rhumel Seguen | 10 04 | 688,82 | 456,98 | 419,64 | 310,89 | 252,34 | 195,39 | 119,03 |
| Boumerzoug | 10 05 | 1581,6 | 993,89 | 714,42 | 638,39 | 501,25 | 372,07 | 208,08 |
| Rhumel Smendou | 10 06 | 1070,8 | 767,16 | 676,36 | 559,78 | 471,53 | 381,81 | 253,08 |

L'estimation des lames d'écoulement s'effectue par la formule suivante:

$$E_{p\%} = \frac{Q_{max} \times t_c}{A}$$

Où :

$E_{p\%}$ = L'écoulement fréquentiel en mm,

$Q_{p\%}$ = Débit fréquentielle en (m³ /s),

T_c = Temps de concentration de Sogreah en heures,

A = La surface de sous bassin en km^2 .

Les valeurs des lames d'écoulement sont estimées pour les fréquences 0.1%, 1%, 2%, 5%, 10%, 20% et 50% (tableau 43).

Tableau43 : l'écoulement fréquentiel d'après le temps de concentration de Sogreah.

| | | L'écoulement fréquentiel $E_{P\%}$ (mm) | | | | | | |
|----------------|-------|---|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|
| Oued | Code | $E_{0,1\%}$ | $E_{1\%}$ | $E_{2\%}$ | $E_{5\%}$ | $E_{10\%}$ | $E_{20\%}$ | $E_{50\%}$ |
| Rhumel Amont | 10 03 | 52.76 | 36.01 | 31.18 | 25.12 | 20.66 | 16.25 | 10.20 |
| Rhumel Seguen | 10 04 | 37.93 | 25.16 | 21.57 | 17.12 | 13.89 | 10.76 | 6.5 |
| Boumerzoug | 10 05 | 67.37 | 42.34 | 35.48 | 27.19 | 21.35 | 15.85 | 8.88 |
| Rhumel Smendou | 10 06 | 69.99 | 50.14 | 44.20 | 36.58 | 30.82 | 24.95 | 16.54 |

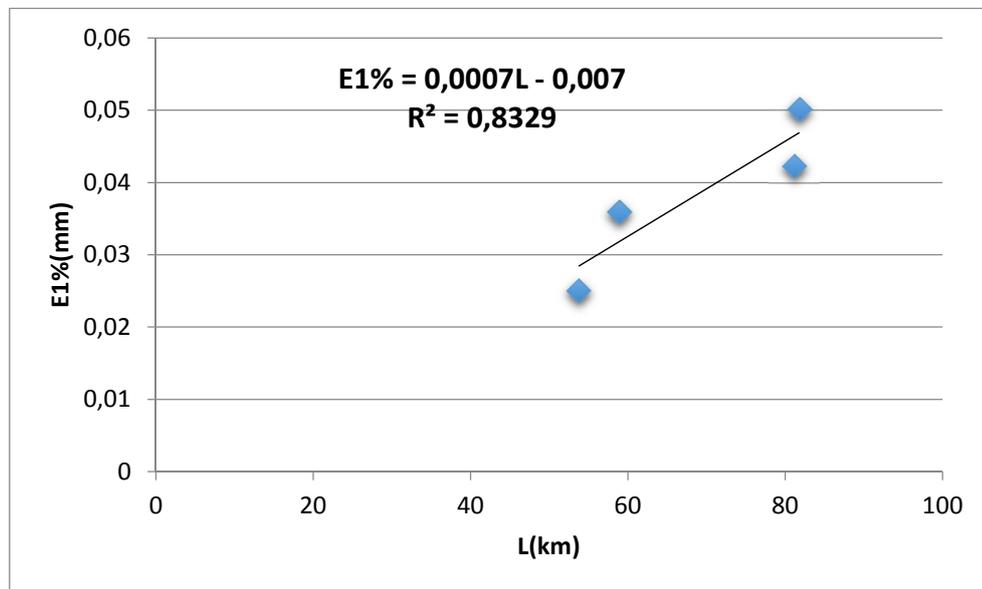


Figure 27 : dépendance de : $E1\%=f(L)$, $r=0.91$.

L'écoulement pluvial de la fréquence 1% peut être exprimé par la formule :

$$E_{1\%} = (0.1L - 1) * 7 * 10^{-3}$$

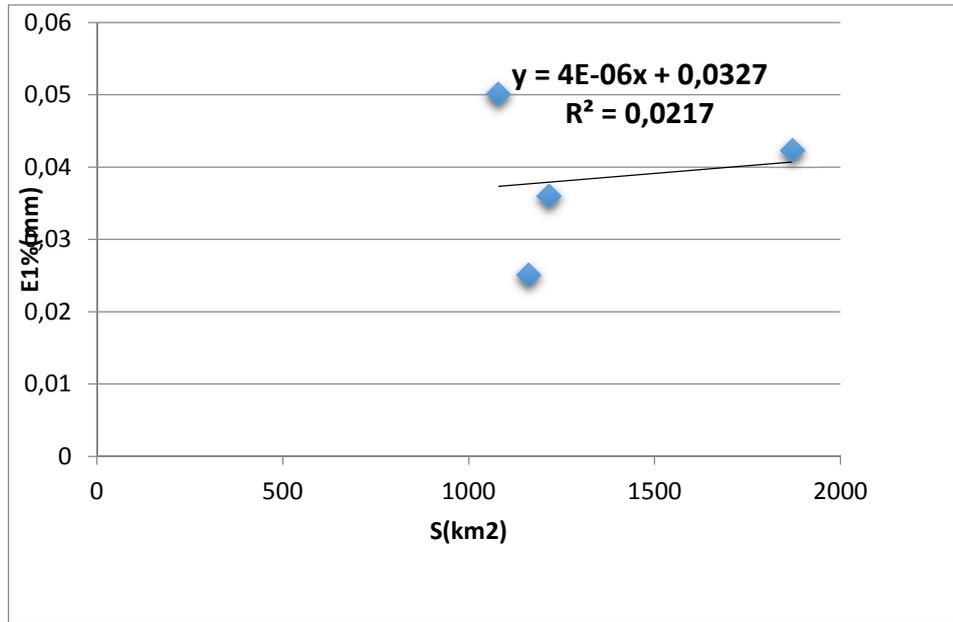


Figure 28 : dépendance de : $E1\% = f(S)$, $r = 0.14$

Le graphe 28 montre que l'écoulement pluvial est indépendant de la surface de sous bassin.

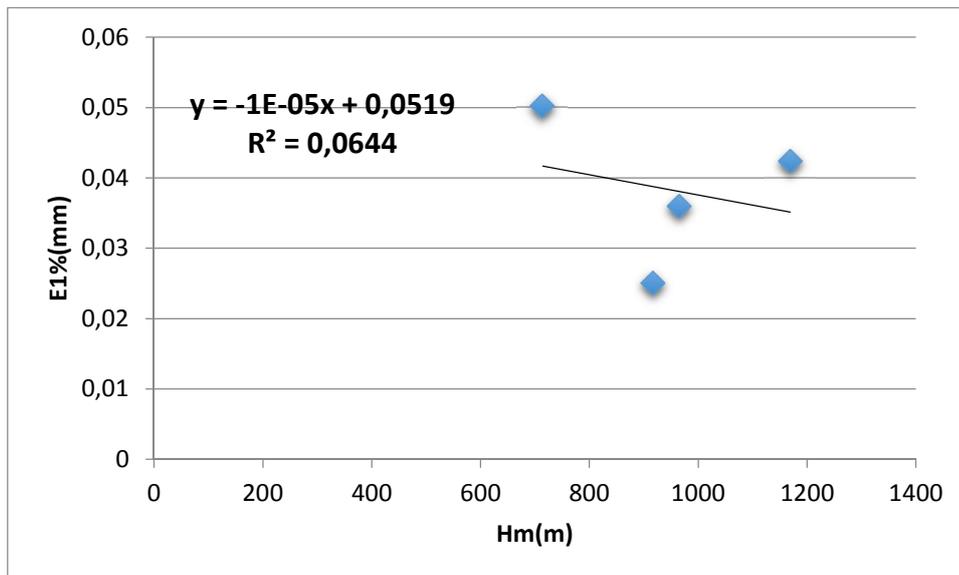


Figure 29 : dépendance de : $E1\% = f(Hm)$, $r = 0.24$.

Donc ce graphe montre que l'écoulement fréquentiel de 1% ne dépend pas de l'altitude moyenne.

A partir de ces deux dernier graphes on constate que l'écoulement d'une fréquence donnée est indépendant des deux principaux facteurs zonaux (S, Hm) donc on peut cartographier la lame écoulee des sous- bassins de Oued El Rhumel-Boumerzoug.

La cartographie de l'écoulement s'est effectuée à partir de Mapinfo, on utilise les coordonnées en degré pour le centre hydrologique de chaque sous bassin.

On prend à titre exemple la cartographie de $E_{1\%}$.

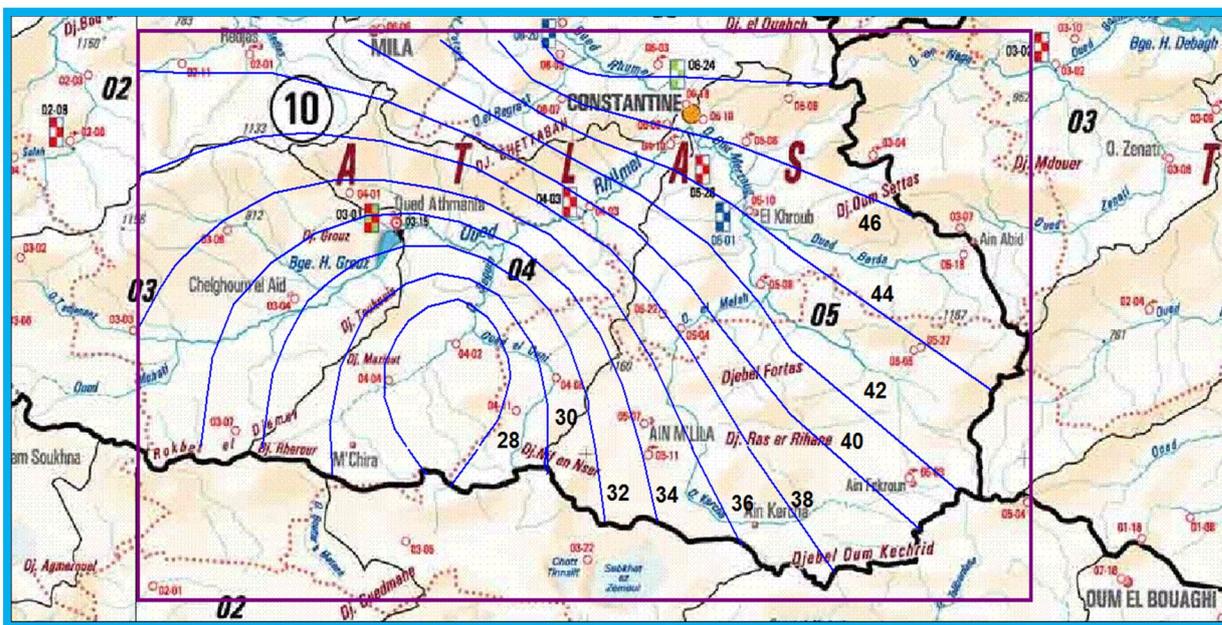


Figure 30 : Carte de $E_{1\%}$ d'Oued Rhumel-Boumerzoug.

Conclusion

L'estimation de l'écoulement fréquentielle, à laquelle nous avons procédé dans ce chapitre est basée sur des séries de pluie journalière maximal de neuf stations pluviométrique situées à l'intérieure et à plus proches du bassin de la Rhumel-Boumerzoug.

L'analyse statistique des données pour but de trouver la moyenne arithmétique, coefficient de variation et l'exposant climatique de chaque station et tracer les cartes correspondantes.

Le traitement des données pour chaque sous bassin tirées directement sur les cartes pour le centre de gravité hydrologique. Le sous bassin de Rhumel-Smendou possède le coefficient de variation le plus faible qui égale à 0,28 .Ce coefficient de variation correspondant la moyenne arithmétique et l'exposant climatique les plus élevés avec $\bar{P}_{\max j} = 53 \text{ mm}$ et $b = 0,34$.

Les valeurs de débit fréquentielle son varié selon le temps de concentration de Giandotti, Sogreah et Boutaoutaou.

L'analyse de la dépendance entre le débit fréquentiel calculé et observé nous donne la formule de temps de concentration la plus adéquate. D'après l'analyse on considère que la formule de Sogreah est la plus avantageuse.

A partir des graphes de dépendance on constate que l'écoulement d'une fréquence donnée est indépendant des deux principaux facteurs zonaux, la surface et l'altitude moyenne.



CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le présent travail a pour objectif, de déterminer les différentes étapes d'estimation de l'écoulement pluvial d'oued el Rhumel-Boumerzoug. Nous avons choisi une procédure que nous voyant intéressante pour notre traitement.

La présente étude contient quatre chapitres, le premier la bibliographique (théorique), la deuxième présentation de la région de l'étude, le troisième tous ce qui concerne la climatologie et le quatrième c'est l'analyse de l'écoulement.

Pour atteindre cet objectif il est nécessaire d'aborder dans un premier temps une étude bibliographique, pour faire une reconnaissance sur les travaux réalisés dans ce domaine et de procéder dans un seconde temps à la présentation de la région de l'étude pour identifier les différents paramètres influencés sur l'écoulement pluviales qui est également l'imperméabilité de la région à partir de la nature géologique et pédologique. Dans le troisième chapitre on a effectué la reconnaissance climatique de la région, à partir de la station d'Ain el Bey qui nous donne des informations complètes concernant l'ensoleillement, l'évapotranspiration et le vent. Dans ce chapitre aussi on a déterminé le changement saisonnier de climat. Le quatrième chapitre concerne l'analyse de l'écoulement pluvial de sous bassin d'Oued El Rhumel-Boumerzoug,

On a effectué le traitement dans le quatrième chapitre à partir des étapes suivantes :

- On a collecter les différent paramètres géométriques qui influe directement sur l'écoulement qui sont la surface du bassin (s), l'altitude maximale $H_{max}(m)$, l'altitude moyenne $H_{moy}(m)$, l'altitude minimale $H_{min}(m)$ et la longueur du cour d'eau principale $L_t(km)$
- On a exploité les données pluviométriques qui sont extraites de l'ANRH, tel que la pluie journalière moyenne annuelle (P_a), la pluie journalière moyenne maximale (P_{jmax}), le coefficient de variation de la pluie maximale journalière (C_v).
- On a calculé le temps de concentration (T_c) avec plusieurs méthodes (Giandotti, Sogreah et Boutaoutaou), ce paramètre qui est le facteur indispensable de l'estimation de l'écoulement. Ce temps est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau qui tombe à un point élevé du bassin versant, pour atteindre l'exutoire.
- L'estimation du débit de la crue pluviale est réalisée à partir de la méthode rationnelle en prenant le coefficient de l'écoulement établi par l'équation de Boutaoutaou.
- L'analyse statistique du débit maximale annuel par la méthode grapho-analytique d'Alekseev et de Gumbel.
- La comparaison entre les valeurs de débit calculées par les méthodes analytiques et celle de valeurs observées, ce traitement a été effectué sur la base de l'analyse de la dépendance, en prenant le coefficient de corrélation comme facteur de la tendance.

On a trouvé comme résultat de cette étude que l'écoulement pluvial dans le bassin d'Oued El Rhumel-Boumerzoug a une grande tendance avec la longueur de cour d'eau principal.

Références Bibliographiques

[1] : **A. Mouslim, H.Mezaache, et al.** *Etude climatique et morphométriques du bassin versant de l'Oued El Rhumel Nord Est Algérien-Mila*, Projet de Fin d'étude en Hydraulique. Centre universitaire de Mila, Institut des Sciences et de Technologie, 2014,42P.

[2] : **Benchaiba Leila.** *Condition d'écoulement et impact sur la mobilisation des ressources en eau Bassin versant de l'oued Bouhamdene (W. DE GUELMA, EST ALGERIEN)*, Mémoire de magistère en Hydraulique, Mobilisation Des Ressources Hydriques. Université El Hadj Lakhdar Batna, Faculté Des Sciences de l'Ingénieur, 2006.213P.

[3] : **Cahier De L'agence ABH N°8**(Agence des bassins hydrographiques constantinois Seybouse-Mellegue) - Juillet 2004 –Constantine –Le Bassin du Kebir Rhumel.

[4] : **Djamel Boutaoutaou,** Houari Zeggane. Méthode de calcul des crues des oueds de l'Algérie. *Revue scientifique et technique*, N°24&25, Juin-Déc. 2014,14P.

[5] : **Kerdoud Souheila.** *Le bassin versant de Beni Haroun eau et pollution*, Mémoire de Magistère en Aménagement du Territoire, Géomorphologie. Université Mentouri- Constantine, Faculté des Sciences de la terre, Géographie et Aménagement du Territoire, 2006.169P.

[6] : **Khelalfa Mohamed.** *Etude de ruissellement pluviale des sous bassins de la Seybouse*, Mémoire de Magistère en Hydraulique Urbaine et Ouvrages Hydrauliques. Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, 2009.165P.

[7] : **Mayoraz Guillaume.** *Etude du ruissellement de surface dans la région de Lyss (Berne)*, Travail de recherche. Université de Fribourg, Département des Géosciences, 2015.100P.

[8] : **MELGHIT MERIEM.** *Qualité physico-chimique, pollution organique et métallique des compartiments Eau / Sédiments de l'Oued Rhumel, et des barrages Hammam Grouz et Beni Haroun*, Mémoire de Magistère en Ecologie. Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, 2006.175P.

[9] : **M^{elle} Mansouri Zina.** *Les ressources en eau et gestion intégrée du bassin versant de l'oued Bouhamdane (Nord -Est Algérien)*, Mémoire de Magistère en Hydrogéologie, Ressources en Eau, gestion intégrée, environnement et le développement durable. Université Badji Mokhtar-Annaba, Faculté des Sciences de la terre ,2009.134P.

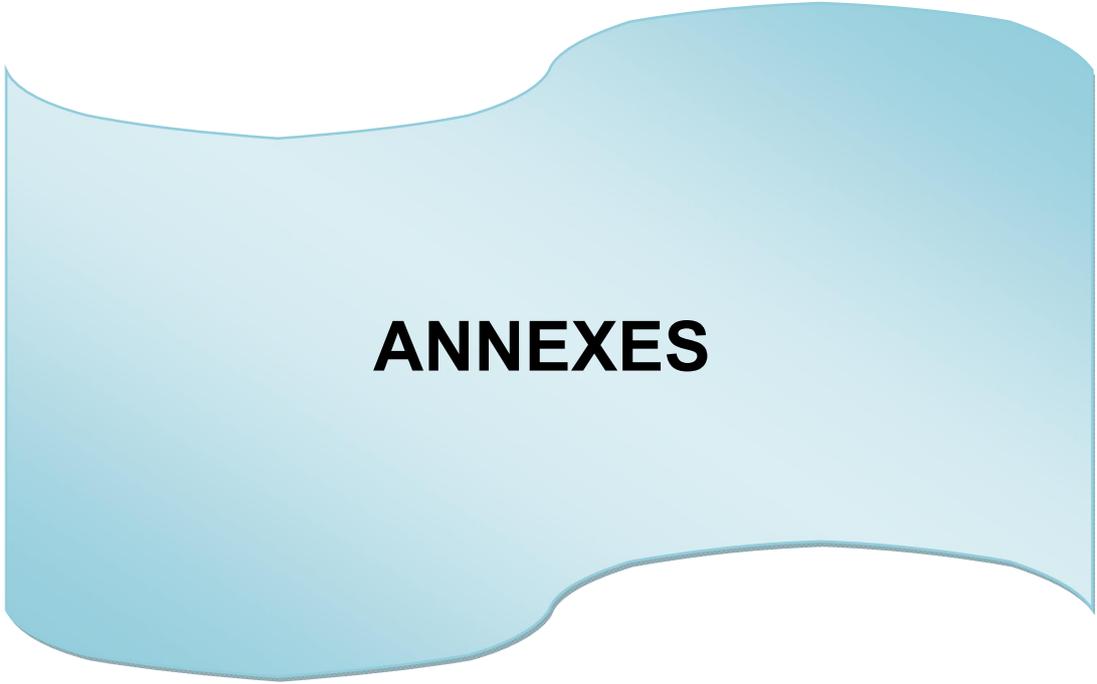
[10] : Tourki Mahmoud .Etude d'érosion et du transport solide dans le bassin versant de l'Oued Kebir Est Nord-est Algérien, Mémoire de Magistère en Hydrologie et Construction Hydraulique. Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences de L'Ingénieur, 2010 .290P.

Sites Internet :

[11] :<https://fr.scribd.com/doc/277439795/253383799-Rapport-Assainissement>.

[12] :<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9900/travaux/optsee/bei/g13/pa05.htm>.

[13] :http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/annexes/AnalFrequ_rep.html.



ANNEXES

II. Annexe 1 .Les altitudes des sous bassins de l'oued Rhumel-Boumerzoug.

| Sous Bassin | H_{max} (m) | H_{min}(m) | H_{moy} (m) | H_{moy} – H_{min} (m) |
|--------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|--|
| Rhumel Amont | 1212 | 719 | 965.5 | 246,5 |
| Rhumel-Seguen | 1285 | 548 | 916.5 | 368,5 |
| Boumerzoug | 1729 | 608 | 1168.5 | 560,5 |
| Rhumel-Smendou | 1256 | 173 | 714.5 | 541,5 |

II. Annexe 2. Les précipitations moyennes en (mm).

| mois Années | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Jul | Aou |
|----------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 1990/1991 | 21.3 | 9.5 | 115.4 | 99.9 | 20.9 | 67.1 | 92.8 | 59.3 | 81 | 8.5 | 3.1 | 1.5 |
| 1991/1992 | 43.7 | 88.3 | 21.8 | 21 | 52.8 | 33.2 | 49.5 | 134.5 | 97.3 | 10.7 | 17.3 | 10.3 |
| 1992/1993 | 20.6 | 22.9 | 116.1 | 192.8 | 49.5 | 58 | 25.5 | 12.3 | 52.8 | 3 | 2.9 | 4.8 |
| 1993/1994 | 22.1 | 11.9 | 22 | 126.6 | 66.1 | 87.5 | 18.1 | 78.8 | 6 | 0 | 0.3 | 2 |
| 1994/1995 | 28.8 | 90.6 | 24 | 49.4 | 216.1 | 17.5 | 84.7 | 30.1 | 5.9 | 52.4 | 0 | 1.2 |
| 1995/1996 | 47.5 | 8.3 | 42.5 | 28.4 | 88 | 181 | 54 | 67 | 62 | 42 | 21 | 15 |
| 1996/1997 | 15 | 10 | 26 | 47 | 33.1 | 22.4 | 59 | 57.7 | 18 | 33.2 | 1.2 | 17.2 |
| 1997/1998 | 38.9 | 50.2 | 110 | 65.6 | 36.4 | 52.7 | 37.4 | 70.8 | 49.6 | 18.3 | 0 | 8.9 |
| 1998/1999 | 75.2 | 32.6 | 135.3 | 53.1 | 73.7 | 42.1 | 57.6 | 31.7 | 10.5 | 20.4 | 3.3 | 7.7 |
| 1999/2000 | 58.7 | 35.7 | 79.2 | 93.6 | 17.4 | 36 | 14.4 | 32.9 | 84.4 | 43.6 | 0 | 15.7 |
| 2000/2001 | 18,4 | 38,3 | 31,7 | 57,7 | 123,4 | 44,7 | 17,6 | 38,3 | 52,9 | 0,0 | 0,2 | 10,4 |
| 2001/2002 | 79,2 | 48,3 | 28,5 | 20,0 | 23,5 | 53,3 | 18,2 | 31,8 | 17,0 | 4,5 | 19,4 | 24,0 |
| 2002/2003 | 22,3 | 26,8 | 134,7 | 109,7 | 231,2 | 50,2 | 31,7 | 120,1 | 44,4 | 1,2 | 2,4 | 11,1 |
| 2003/2004 | 61,5 | 46,0 | 19,8 | 148,0 | 231,2 | 50,2 | 31,7 | 120,1 | 44,4 | 1,2 | 2,4 | 11,1 |
| 2004/2005 | 24,5 | 30,4 | 142,9 | 181,2 | 46,0 | 55,8 | 28,7 | 61,4 | 6,8 | 13,9 | 7,9 | 6,8 |
| 2005/2006 | 14,4 | 2,1 | 18,6 | 63,1 | 78,9 | 50,3 | 33,4 | 14,7 | 83,8 | 3,6 | 0,9 | 18,6 |
| 2006/2007 | 26,2 | 10,0 | 19,1 | 118,8 | 14,2 | 28,9 | 117,8 | 66,2 | 26,1 | 13,6 | 4,3 | 2,4 |
| 2007/2008 | 59,9 | 39,1 | 23,8 | 84,4 | 9,9 | 8,7 | 72,6 | 23,1 | 58,2 | 5,8 | 11,3 | 33,9 |
| 2008/2009 | 38,8 | 21,0 | 37,6 | 27,0 | 76,4 | 48,6 | 81,1 | 113,3 | 43,4 | 0,0 | 2,0 | 37,5 |
| 2009/2010 | 103,9 | 49,4 | 24,9 | 47,1 | 74,0 | 30,5 | 46,9 | 67,2 | 50,0 | 16,5 | 2,0 | 8,0 |
| 2010/2011 | 37,3 | 48,1 | 76,4 | 33,7 | 8,0 | 174,5 | 65,4 | 66,4 | 40,6 | 24,2 | 7,0 | 5,2 |
| 2011/2012 | 13,4 | 87,0 | 26,8 | 53,3 | 34,6 | 104,6 | 52,0 | 68,4 | 19,5 | 6,2 | 1,8 | 10,5 |
| 2012/2013 | 36,2 | 33,4 | 29,4 | 19,0 | 64,0 | 111,9 | 47,4 | 31,0 | 10,0 | 17,0 | 2,6 | 36,0 |
| 2013/2014 | 23,0 | 26,8 | 86,2 | 29,6 | 42,8 | 31,0 | 131,7 | 5,7 | 60,3 | 14,8 | 1,0 | 0,4 |

II. Annexe 3. Températures moyennes en (°C).

| mois Anneés | Sep | Oct | Nov | Déc | Jan | Fév | Mar | Avr | Mai | Jui | Jul | Aou |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1990/1991 | 24,3 | 18,5 | 11,4 | 5,7 | 5,9 | 6,1 | 10,80 | 9,90 | 12,90 | 20,7 | 25,5 | 25,4 |
| 1991/1992 | 22,0 | 16,1 | 10,4 | 5,8 | 5,1 | 6,8 | 8,9 | 11,4 | 16,0 | 19,2 | 22,7 | 24,9 |
| 1992/1993 | 21,8 | 16,7 | 11,9 | 7,1 | 5,0 | 5,8 | 8,6 | 12,3 | 17,3 | 22,6 | 25,4 | 26,2 |
| 1993/1994 | 21,7 | 17,8 | 10,9 | 7,8 | 7,5 | 8,3 | 11,3 | 10,3 | 19,7 | 22,5 | 26,7 | 28,7 |
| 1994/1995 | 22,9 | 16,8 | 12,7 | 7,9 | 5,9 | 9,7 | 9,0 | 11,2 | 18,2 | 21,9 | 25,9 | 24,5 |
| 1995/1996 | 20,7 | 16,7 | 11,5 | 10,1 | 9,1 | 6,5 | 10,2 | 11,9 | 16,4 | 19,7 | 24,6 | 25,6 |
| 1996/1997 | 19,3 | 14,5 | 12,2 | 9,6 | 8,3 | 9,1 | 9,1 | 12,3 | 19,9 | 24,9 | 25,5 | 25,3 |
| 1997/1998 | 21,0 | 16,7 | 11,7 | 8,3 | 7,1 | 8,1 | 9,4 | 13,3 | 16,2 | 23,6 | 26,5 | 25,4 |
| 1998/1999 | 22,2 | 14,5 | 10,0 | 6,4 | 7,1 | 5,5 | 10,0 | 13,3 | 21,0 | 24,2 | 25,4 | 28,8 |
| 1999/2000 | 23,1 | 19,3 | 10,4 | 7,5 | 4,6 | 8,2 | 11,2 | 14,7 | 20,1 | 22,3 | 26,9 | 26,4 |
| 2000/2001 | 21,9 | 15,9 | 12,3 | 9,1 | 8,0 | 7,4 | 14,3 | 12,4 | 17,2 | 23,8 | 27,0 | 26,3 |
| 2001/2002 | 21,6 | 20,2 | 10,9 | 6,6 | 6,4 | 8,6 | 11,1 | 14,0 | 18,7 | 24,8 | 25,6 | 25,0 |
| 2002/2003 | 21,3 | 17,9 | 12,2 | 9,2 | 7,0 | 6,3 | 10,5 | 14,0 | 17,7 | 25,3 | 28,4 | 27,4 |
| 2003/2004 | 20,9 | 18,6 | 12,0 | 6,8 | 7,2 | 8,8 | 10,6 | 11,9 | 15,1 | 21,4 | 25,7 | 26,9 |
| 2004/2005 | 21,0 | 19,4 | 9,9 | 7,9 | 4,6 | 4,7 | 10,8 | 13,2 | 19,2 | 23,9 | 26,8 | 24,6 |
| 2005/2006 | 21,1 | 17,8 | 11,8 | 7,0 | 5,5 | 6,9 | 11,0 | 15,6 | 20,1 | 24,9 | 26,8 | 24,4 |
| 2006/2007 | 21,0 | 19,1 | 12,5 | 8,4 | 8,3 | 9,4 | 9,0 | 13,4 | 17,0 | 23,2 | 26,2 | 25,9 |
| 2007/2008 | 21,2 | 16,9 | 9,9 | 6,8 | 7,4 | 8,2 | 9,7 | 13,6 | 18,3 | 21,8 | 27,1 | 26,2 |
| 2008/2009 | 21,7 | 16,9 | 10,3 | 6,8 | 7,1 | 6,5 | 9,4 | 10,9 | 17,7 | 23,0 | 28,3 | 25,6 |
| 2009/2010 | 19,9 | 15,3 | 11,0 | 9,8 | 7,8 | 9,1 | 10,5 | 13,6 | 15,3 | 21,2 | 26,0 | 25,5 |
| 2010/2011 | 20,6 | 16,4 | 11,6 | 8,2 | 7,2 | 6,5 | 9,9 | 14,5 | 16,9 | 21,3 | 26,2 | 26,5 |
| 2011/2012 | 22,1 | 15,8 | 12,1 | 7,7 | 6,2 | 3,7 | 10,1 | 12,7 | 17,8 | 25,6 | 27,4 | 28,3 |
| 2012/2013 | 21,7 | 18,4 | 12,9 | 7,8 | 6,9 | 5,9 | 11,2 | 13,8 | 16,1 | 20,2 | 26,0 | 24,5 |
| 2013/2014 | 21,3 | 20,1 | 10,5 | 7,0 | 8,1 | 8,9 | 8,7 | 13,7 | 16,9 | 22,6 | 25,6 | 26,3 |