

**ETUDE DES RESSOURCES EN EAUDU
BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAMPAR
L'UTILISATION DU SIG**

Présentée par :

Melle HAMENNI Nassima

M^rMESBAH Mohamed Professeur FSTGAT-USTHB Directeur de Thèse

M^rSEMAR Ahcène Maître de Conférences ENSA Co-directeur de Thèse

Soutenu le : 15 / 05 / 2011

Devant le jury composé de : M^r AIDAOUI Abdellah Professeur ENSA Président M^r OLDACHE
El Hadi Maître de Conférences ENSA Examineur M^{me} GAMANE S.D. Maître de Conférences
FGC-USTHB Examinatrice

Table des matières

Dédicace ..	6
REMERCIEMENTS ..	7
RESUME ..	8
SUMMARY ..	9
ص:خلم ..	10
Liste des abréviations ..	11
INTRODUCTION GENERALE ..	12
PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE ..	15
CHAPITRE 1 : PRESENTATIONS DU SIG ..	15
INTRODUCTION ..	15
1.1 DEFINITIONS D'UN SIG ..	15
1.2 HISTORIQUE ..	16
1.3 LES COMPOSANTS D'UN SIG ..	17
1.4 MODELES DE DONNEES VECTEURS ET RASTER ..	18
1.5 FONCTIONNEMENT D'UN SIG ..	19
1.6 LE RÔLE DES SIG ..	22
1.7 MODELES NUMERIQUES D'ALTITUDE ..	23
CONCLUSION ..	24
CHAPITRE 2 : RESSOURCES EN EAU ..	24
INTRODUCTION ..	24
2.1 REPARTITION GLOBALE DE L'EAU ..	25
2.2 TYPE DE RESSOURCES EN EAU ..	26
2.3 LE CYCLE DE L'EAU ..	27
2.4 LES LOIS DE LA PLUVIOSITE ..	30
2.5 FACTEURS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS ..	31
2.6 RESSOURCES EN EAUX EN ALGERIE ..	31
2.7 RESSOURCES EN EAU PAR UTILISATION DU SIG ..	33
CONCLUSION ..	33
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES ..	34
CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, GEOLOGIQUE ET RESSOURCES EN EAU DE LA REGION ..	34
I - CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE ..	34
II - CONTEXTE GEOLOGIQUE ..	43
III - RESSOURCES EN EAUX DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM ..	53
CHAPITRE 4 : APPROCHE METHODOLOGIQUE ..	66
4.1 ETUDE DE LA PLUVIOMETRIE ..	66
4.2 ETUDE HYDROLOGIQUE ..	77
4.3 CARTOGRAPHIE NUMERIQUE ..	80
TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION ..	84
CHAPITRE 5 : ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE ..	84

INTRODUCTION . .	84
5.1 Analyse des résultats . .	84
5.2 Les variations des précipitations interannuelles . .	87
5.3 Précipitations mensuelles . .	89
5.4 COMBINAISON DES FACTEURS THERMIQUE ET PLUVIOMETRIQUE : LES ZONES BIOCLIMATIQUES . .	90
CONCLUSION . .	92
CHAPITRE 6 : BILAN HYDROLOGIQUE . .	93
INTRODUCTION . .	93
6.1 DEFICIT D'ECOULEMENT-EVAPOTRANSPIRATION . .	93
6.2 HYDROLOGIE DE SURFACE . .	104
6.3 ESTIMATION DU BILAN HYDROLOGIQUE . .	109
CONCLUSION . .	110
CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE . .	110
INTRODUCTION . .	111
7.1 CARTE HYSOMETRIQUE . .	111
7.2 REGRESSION MULTIPLE . .	112
7.3 CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS . .	116
7.4 Cartographie des isothermes annuels . .	118
7.5 Cartographie des évapotranspirations potentielle (ETP) . .	121
7.6 Evapotranspiration réelle (ETR) . .	122
7.7 Ecoulements . .	123
CONCLUSION . .	124
CONCLUSION GENERALE . .	126
Références bibliographiques . .	129
ANNEXES . .	137
Annexe 1: Détection des anomalies systématiques et critique des données pluviométriques par la méthode des doubles cumuls (Stations Hétérogènes). . .	137
Annexe 2-1 : Détection des anomalies systématiques des valeurs à tester par rapport à la valeur de référence(Stations Homogènes). . .	138
Annexe 2-2 : Détection des anomalies systématiques des valeurs à tester par rapport à la valeur de référence(Stations Homogènes). . .	138
Annexe 2-3 : Détection des anomalies systématiques des valeurs à tester par rapport à la valeur de référence (Stations Homogènes). . .	139
Annexe 3-1 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Racine normale (1968 - 2004) . .	140
Annexe 3-2 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Racine normale (1968 - 2004) . .	141
Annexe 3-3 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Racine normale (1968 - 2004) . .	142
Annexe 4 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Log normale (1968 - 2004) . .	143
Annexe 5 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Normale (1968 - 2004) . .	144
Annexe 6 : Moyennes annuelles cumulées des hauteurs de pluies (stations hétérogènes). . .	145

<u>Annexe 7</u> : Précipitations moyennes mensuelles en mm (période:1968-2004) dans le bassin versant de la Soummam et sa périphérie. . .	146
<u>Annexe 8-1</u> : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004 . .	147
<u>Annexe 8-2</u> : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004 . .	148
<u>Annexe 8-3</u> : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004 . .	149
<u>Annexe 8-4</u> : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004 . .	150
8-5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004 . .	151
<u>Annexe 9-1</u> : Paramètres climatiques mensuels interannuels aux niveaux des stations : Béjaïa, BBA, Sétif (1988-2004) et Bouira (1990-004) . .	152
<u>Annexe 9-2</u> : Paramètres climatiques mensuels interannuels aux niveaux des stations : Béjaïa, BBA, Sétif (1988-2004) et Bouira (1990-004) . .	153

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail A mes chers parents A mes frères et sœurs A mes neveux et nièces
A toute ma famille*

REMERCIEMENTS

Je voudrais adresser mes premiers remerciements à mon directeur de thèse Monsieur MESBAH M. Professeur à la FSTGAT-USTHB et à mon co-directeur Monsieur SEMAR A. Maître de conférences à l'ENSA qui ont accepté d'encadrer cette thèse. Ils m'ont apporté l'un et l'autre un encadrement différent mais complémentaire.

Un grand merci au président du jury, Monsieur AIDAOUI A. Professeur à l'ENSA ainsi qu'aux membres du jury Madame GAMANE D. Maître de conférences à la FGC-USTHB et Monsieur OLDACHE E.H. Maître de conférences à l'ENSA d'avoir accepté de juger ce mémoire.

Je remercie, le personnel de l'A.N.R.H et de l'A.B.H qui ont mis à ma disposition les données de la région d'étude.

Je voudrais également adresser mes plus profonds remerciements à ma famille pour leur soutien et leur aide.

RESUME

Les ressources en eau en Algérie sont limitées, vulnérables et inégalement réparties. Ces ressources ont par ailleurs, subi durant ces dernières décennies les effets néfastes de la pollution, de la sécheresse et de la mauvaise gestion. Une évaluation des ressources disponibles (eau de surface, eau souterraine, eau de pluie) est nécessaire pour subvenir aux besoins dans différents domaines.

Un système d'Information Géographique est un outil informatique permettant de représenter et d'analyser tous les éléments qui existent sur Terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent. Une méthodologie de travail qui consiste à représenter les informations collectées sous forme de cartes thématiques, a été réalisée en utilisant les logiciels « ArcGis, GvSig et Surfer » par l'exploitation des données de bases disponibles au niveau des organismes (ABH-ANRH) ou bien par digitalisation de fond cartographique.

Une synthèse des concepts et études de l'ensemble des paramètres géomorphologiques, géologiques, et qualité de la ressource en eau à l'échelle du bassin de la Soummam d'une superficie de 9125 Km² a été effectuée. Aussi, le traitement et l'analyse des chroniques des précipitations de 35 stations sur une période de 36 années ont été étudiés, afin d'établir un bilan hydrologique qui permettra d'estimer le ruissellement et l'infiltration.

Toute étude hydrologique est fortement conditionnée par la qualité de l'estimation spatiale de la pluviométrie. Egalement la compréhension des modalités de la reconstitution de la ressource en eau suppose une bonne connaissance de la structuration des champs de précipitations dans l'espace étudié. Dans cette optique, nous avons entamé un dernier chapitre sur la cartographie automatique des précipitations à l'aide du Modèle Numérique d'Altitude (MNA). L'interpolation spatiale par krigeage a été étendue aux autres éléments du bilan hydrologique (déficit d'écoulement et écoulement).

Mots-clés : Ressources en eau, précipitation, Bilan hydrologique, SIG, cartographie automatique

SUMMARY

Water resources in Algeria are limited, vulnerable and unequally distributed. These resources have also, occurred during these last decades the adverse effects of pollution, drought and bad management. An evaluation of available resources (surface water, groundwater, rainwater) is necessary to provide the needs in different domains.

A Geographic Information System is a computer tool to represent and analyze all the elements that exist on earth and all events that occur there. A working methodology that is to represent the information collected in the form of thematic maps was achieved using the software "ArcGis, GvSig and Surfer " by using data bases available at the agencies level (ABH-ANRH) or by digitalization of the basemap.

A synthesis of concepts and studies for all parameters geomorphological, geological, and quality of water resources at Soummam Watershed scale of 9125 km² area was done. Also, treatment and analysis of chronic rainfall of 35 stations over a period of 36 years were studied to establish a water balance that will estimate the runoff and infiltration.

Any hydrological study is highly conditioned on the quality of the spatial estimation of rainfall. Also understanding the terms of the recovery of water resources requires a good knowledge of the structure of precipitation fields in the study area. In this context, we started a last chapter on automatic mapping of rainfall using the Digital Elevation Model (DEM). The spatial interpolation by kriging has been extended to other elements of water balance (deficit flow and flow).

Keywords : water resources, precipitation, water balance, GIS, automated cartography.

ص:خلم

تعتبر الموارد المائية بالجزائر محدودة، قليلة وغير منتظمة الانتشار. حيث أن هذه الموارد خضعت في العشرين الاخيرين إلى عوامل التلوث السلبية، الجفاف والتسيير الخير جيد. إن عملية التقييم للموارد المتوفرة (المياه السطحية، المياه الجوفية، مياه الأمطار) هي غير ضرورية لسد الحاجيات في مختلف الميادين.

ويستعمل نظام الإعلام الجغرافي، لعملية الإبراز والفحص لكل ما هو موجود على الأرض، ضف إلى ذلك كل الحوادث الطارئة في هذا المجال. إن طريقة العمل المستعملة تسمح باستغلال كمية هائلة من المعلومات المجمعَة وإبرازها على شكل خرائط. ولقد تم تحقيق كل هذا بفضل استعمال مجموعة من الأنظمة (ArcGis، GvSig و Surfer) وذلك باستغلال المحطات القاعدية المتوفرة على مستوى المؤسسات أو بعملية الترمجة الإصبجية والرقمية للمسح الجغرافي، (Digitalisation de fond cartographique). كما تمت عملية حوصلة للمعايير، والدراسات الخاصة بالخصائص الجيومورفولوجية ونوعية المورد المائي على مستوى حوض الصومام، والذي تقدر مساحته بـ 9 125 كلم². من جهة أخرى، أخذت هذه الدراسة على عاتقها 35 محطة وهذا على مرور مرحلة تقدر بـ 36 سنة. ولقد تمت هذه الدراسة بهدف موازنة هيدرولوجية هذه الأخيرة تسمح بعملية تقدير التدفق المائي وعملية التوغل.

إن كل دراسة هيدرولوجية لها علاقة وطيدة بنوعية التقدير الفضائي للمطر، ضف إلى ذلك عملية فهم النماذج فتجدد المورد المائي يفترض معرفة لعملية بناء الحقول المطرية على مستوى المساحة المدروسة. وفي هذا المجال خصص الفصل الأخير لرسم الخرائط الاتوماتيكية للأمطر مستعملين لذلك النموذج الرقمي للحولما يسمى بالموازنة الهيدرولوجية (فقد التدفق- والتدفق)

الكلمات المفتاح : الموارد المائية - الأمطر- الموازنة الهيدرولوجية - SIG - علم الخرائط الأوتوماتيكي.

Liste des abréviations

ABH	: A gence des B assins H ydrographiques : A nalyse en C omposantes P incipales
ACP	: A gence Nationale de G estion des infrastructures hydrauliques pour l' I rrigation et
AGID	: A gence N ationale des R essources H ydraulique : B ordj B ou A rreridj : C
MRE	: M inistère des R essources en E au : D irection de l' H ydraulique A gricole : D irection d' H ydraulique de W ilaya : D irection de la M obilisation des R essources en E au : D irection des S ervices A gricoles : E vaporation : E vapotranspiration P otentielle : E vapotranspiration R éelle : G rand P érimètre I rrigué : G lobal P ositioning S ystem : I nfiltration : I nstitut A tlantique d' A ménagement des T erritoires : I nstitut N ational de la R echerche A gronomique d' A lgérie : M inistère d' A griculture et D éveloppement R ural : M odèle N umérique d' A ltitude : M odèle N umérique de T errain : M inistère des R essources en E au : O ffice M ondiale de M étéorologie : O rganisation M ondiale de la S anté : O ffice National de la M étéorologie : O ffice N ational des S tatistiques : P récipitation : P etite et M oyenne H ydraulique : P lan N ational de l' E au : D ébit : R uisselement : R éserve F acilement U tilisable : R ecensement G énéral de l' A griculture : R égression L inéaire M ultiple : S uperficies A gricoles U tiles : S ociété F rançaise de P hotogrammétrie et T élé-détection : S ystème de G estion de B ase de D onnées : S ystème d' I nformation G éographique : T riangular I regular N etwork

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est indispensable à toute forme de vie terrestre, sa réserve totale sous forme solide, liquide et gazeuse est de 1.386 millions de km³. Ce volume est très irrégulièrement réparti à la surface de la planète : 97 % du volume total s'accumule dans les océans, 2 % sur les continents, 0,6 % en phase solide dans les inlandsis polaires et les glaciers, enfin une part très modeste demeure en phase gazeuse dans l'atmosphère.

L'eau qui constitue le patrimoine naturel le plus précieux de l'humanité est très inégalement répartie dans le monde et sa disponibilité est l'une des clés de la distribution des êtres vivants à la surface de la Terre (CATE, 2000).

La disponibilité géographique et saisonnière des ressources en eau est une préoccupation commune à tous les pays du bassin méditerranéen. Source potentielle de conflits entre les usagers, la gestion de l'approvisionnement en eau constitue un enjeu majeur.

On constate que pour la rive Nord, les ressources sont plus abondantes et la disponibilité est relativement stable. Pour la rive Sud, en revanche non seulement les ressources sont faibles mais du fait de la pression démographique, la disponibilité par habitant est réduite considérablement avec le temps (CATE, 2000).

Abondante ou rare, l'eau disait Léonard de Vinci 'est la force conductrice de la nature'. La santé et le bien être de l'humanité, tout comme la survie des écosystèmes de la planète, reposent sur l'eau. Beaucoup de pays ne disposent pas d'une offre d'eau ou très peu. L'Algérie en est un. Elle est confrontée à un manque d'eau important dû à la semi-aridité de son territoire et aux faibles précipitations (Kerdoun, 1998).

En Algérie, le problème de l'eau a commencé à se poser avec acuité durant ces dernières décennies qui est caractérisée par une sécheresse persistante provoquant la diminution des ressources en eau. Sur le plan pluviométrique, celui-ci se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les potentielles en eau connues à ce jour, sont estimées à 19,3 Mm³ par an dont : 13,7 Mm³ des régions du Nord et 5,6 Mm³ des régions sahariennes (M.R.E, 2004).

Au fur et à mesure qu'elles se raréfient, les ressources en eau requièrent une gestion toujours plus précise qui réduise au minimum les pertes et les usages non productifs de l'eau. Une telle gestion nécessite une connaissance toujours plus détaillée des différents éléments du bilan d'eau et des processus hydrogéologiques: la ressource et la demande, leur distribution spatiale et temporelle et leur qualité, les pertes, leur impact sur la qualité de l'eau, ainsi que toutes les actions nuisibles de l'Homme qui peuvent avoir une influence sur le bilan d'eau (Smida et al, 2005).

Il y a quelques années la mise en place des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) paraissait réservée aux grandes structures. Aujourd'hui les progrès informatiques et les possibilités offertes en matière de gestion et d'analyse, conduisent à la généralisation de l'outil à tous les échelons du territoire. Cependant la mise en place d'un SIG, quelle que soit la taille du territoire, reste un investissement humain et financier important (IAAT, 2003).

Les dernières décennies ont vu la capacité de stocker, gérer et analyser l'information relative aux ressources en eau, se multiplier à une vitesse impressionnante. On en arrive paradoxalement à une situation dans laquelle les données de base nécessaires à l'utilisation des logiciels et modèles disponibles font de plus en plus défaut à l'heure où la rareté croissante de l'eau exige une connaissance toujours plus précise de la ressource et de son utilisation (Smida et al, 2005).

Utilisé dès les années soixante, dans une optique d'archivage, le SIG s'est peu à peu développé et n'a cessé d'agrandir l'éventail de ses interventions au point où il permet d'établir des liens complexes entre plusieurs types de données géographiques (hydrologiques, géologiques, géomorphologiques, pédologiques, etc...).

Tout comme le traitement statistique des données sur ordinateur et leurs représentations graphiques, l'emploi de la cartographie est privilégié car elle est tout à la fois outil de recherche et moyen d'expression géographique.

En effet, les SIG se présentent actuellement parmi les meilleures techniques d'aide à la décision par leurs grandes capacités cartographiques, d'analyse spatiale des phénomènes naturels et d'interprétation.

Egalement, de nombreux auteurs ont estimé intéressant et utile de trouver des relations liant le paramètre pluie aux facteurs relatifs au relief et à la situation géographique pour mieux expliquer la répartition spatiale des précipitations et de l'évapotranspiration. Ces relations permettent d'estimer au mieux en tout point de l'espace.

Les précipitations et les facteurs climatiques dans leur ensemble, variables aléatoires dans le temps et l'espace, permettent d'expliquer quantitativement les variations des composantes du régime hydrologique dans sa conception la plus large.

Plus encore que les facteurs morphologiques, lithologiques et biogéographiques, les conditions climatiques d'un bassin versant jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche, 1963, Cosandey, 2001).

Ainsi, nous espérons apporter une contribution utile grâce à l'étude des ressources en eau du bassin versant de la Soummam vaste de 9 125 km², le plus important de la région hydrographique Algérois-Hodna-Soummam.

Les recherches et les études concernant les précipitations, source principale d'eau, butent sur une difficulté fondamentale: l'extrême variabilité des champs de précipitations sur de grandes gammes d'échelle d'espace et de temps.

Notre objectif est de réaliser des cartes hydroclimatiques (pluviométrie, température, déficit hydrique et l'écoulement), en vue de déterminer par le biais de l'outil statistique et des systèmes d'informations géographiques, les zones sujettes aux déficits hydriques à l'échelle annuelle.

Les deux premiers chapitres de cette étude présentent une synthèse bibliographique qui, en premier lieu, nous donne une idée générale sur le SIG et son fonctionnement et, en second lieu, s'intéresse à la ressource en eau, à la disponibilité qualitative et quantitative de cette ressource naturelle et de sa variabilité dans le temps et dans l'espace.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes d'abord attachés à caractériser le cadre de notre étude, qui consiste à présenter le bassin versant de la Soummam, puis la description des différents paramètres physiques qui influencent les écoulements superficiels, les caractéristiques géologiques et enfin la ressource en eau au niveau du bassin d'étude.

Le quatrième et cinquième chapitre consistent à déterminer les divers outils du traitement et analyse statistique des données climatiques. Ceci repose sur l'application des méthodes statistiques (Analyse en Composantes Principales et le modèle de la Régression Multiple), afin d'établir un bilan hydrologique qui permettra d'estimer certains processus hydrologiques du cycle de l'eau : ruissellement et infiltration. Aussi, d'interpréter les mesures hydrologiques au niveau des différentes stations hydrométriques et enfin de tenter de faire ressortir le caractère déficitaire, équilibré ou excédentaire (sixième chapitre).

Le dernier chapitre traite la répartition spatiale des précipitations (annuelles et mensuelles) et notamment du déficit hydrique à l'échelle spatiales et temporelles, c'est-à-dire le passage d'une information mesurée, ponctuelle et brute, à une information traitée, interpolée et numérisée par l'intégration du SIG et du MNA.

PREMIERE PARTIE : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : PRESENTATIONS DU SIG

INTRODUCTION

A la fin des années 70, de nouvelles techniques se développent dans l'interprétation des données en : pédologie, hydrographie, topographie et télédétection, et avec l'essor de l'information, est apparu le besoin de numériser l'information géographique et de la gérer en se servant d'un ordinateur. Ainsi sont nés les SIG.

L'information géographique désigne toute information relative à un point ou un ensemble de points spatialement référencés à la surface de la Terre. Elle intéresse tous les gestionnaires de l'espace (hydrogéologues, écologues, agronomes, urbanistes, aménageurs, etc.).

La demande de données spatiales s'est accrue ces dernières années car l'on sait désormais qu'il est essentiel de connaître la distribution spatiale de la réponse hydrologique pour bien comprendre les processus sous-jacents de la génération de l'écoulement (Roche, 1963).

1.1 DEFINITIONS D'UN SIG

De nombreuses définitions d'un SIG existent, parmi elles, on peut se référer aux quarts suivantes :

- Un système d'information géographique est un système informatique de matériels, de logiciels, et de processus conçu pour permettre : la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion (CFCICN , 1988) ;
- Un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace (Landry, 2005);
- Les SIG procurent une plus grande vitesse et proposent des outils sans cesse innovant dans l'étude et l'interprétation comme le montre la [figure 1, c'est représenter, analyser et comprendre tous les éléments qui existent sur Terre ainsi que tous les événements qui s'y produisent.](#)

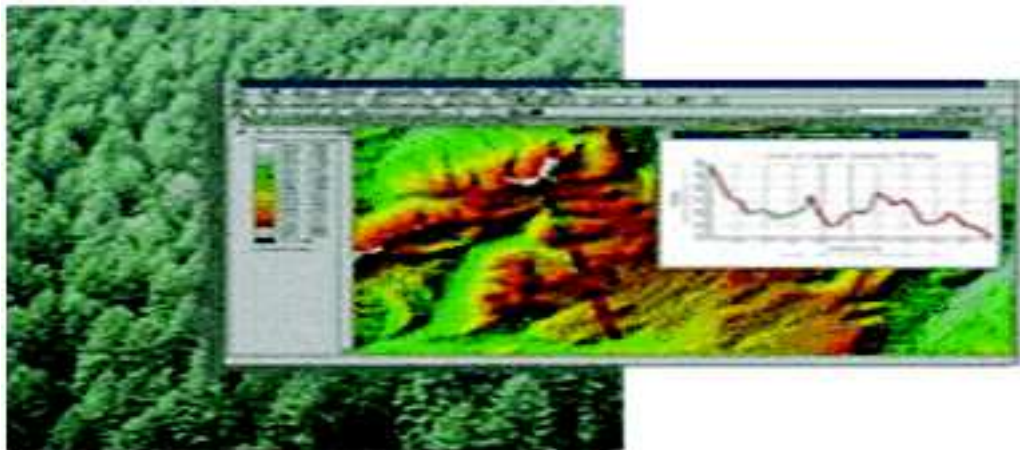


Figure 1 : Visualisation et analyse géographique

- Les SIG offrent toutes les possibilités des bases de données (telles que requêtes et analyses statistiques) et ce, au travers d'une visualisation unique et d'analyse géographique propres aux cartes. Les enjeux majeurs auxquels nous avons à faire face aujourd'hui (au bassin versant, réseau hydrographique, etc.) ont tous un lien étroit avec la géographie (SFPT, 1989) ;

1.2 HISTORIQUE

La première application souvent citée de l'analyse spatiale en épidémiologie est l'étude menée avec succès par le docteur John Snow pendant l'épidémie de choléra dans le quartier de Soho à Londres en 1854 : ayant représenté sur un plan la localisation des malades et l'endroit où ils puisaient leur eau, il détermina que c'était l'eau d'un certain puits qui était le foyer de contamination.

Dans les années 1960, les cartes de l'Afrique de l'Est trop nombreuses pour permettre de localiser les meilleurs endroits pour créer de nouvelles implantations forestières font naître l'idée d'utiliser l'informatique pour traiter les données géographiques.

L'usage accru de ces techniques et méthodes dans la science et l'aménagement du territoire et pour le suivi, la gestion et la protection de la biodiversité a été permis par l'avancée de l'informatique, et encouragé par la prise de conscience environnementale. Cette évolution des applications a permis de nouvelles approches scientifiques interdisciplinaires et collaboratives depuis les années 1970 (Lavigne, Magdelaine, 2001).

Maguire et al. (1991) distinguent trois périodes principales dans l'évolution des SIG :

- fin des années 1950 – milieu des années 1970 : début de l'informatique, premières cartographies automatiques ;
- milieu des années 1970 – début des années 1980 : diffusion des outils de cartographie automatique et SIG dans les organismes d'État (armée, cadastre, services topographiques, ...)
- depuis les années 1980 : croissance du marché des logiciels, développements des applications sur PC, mise en réseau (bases de données distribuées, depuis les années 1990, des applications sur Internet) et une banalisation de l'usage de l'information géographique (cartographie sur Internet, calcul d'itinéraires routiers,

utilisation d'outils embarqués liés au GPS...), apparition de « logiciels libres », etc. (Landry, 2005).

1.3 LES COMPOSANTS D'UN SIG

Un SIG est constitué de cinq composants majeurs tels que présentés par la figure 2 (Esri France, 2004) :



Figure 2 : Les composants d'un SIG

· Les données

Les données sont certainement les composantes les plus importantes des SIG :

- Les données géographiques peuvent être, soit importées à partir de fichiers, soit saisies par un opérateur. Elles possèdent deux composantes :
 - les données géométriques renvoient à la forme et à la localisation des objets ou phénomènes ;
 - les données graphiques renvoient aux paramètres d'affichage des objets (type de trait, couleur...).
- Les données attributaires ou alphanumériques ou sémantiques sont les données associées à un objet ou une localisation géographique, soit pour décrire un objet géographique, soit pour localiser des informations : nom d'une route, type d'un bâtiment localisé par son adresse, nombre d'habitants d'un immeuble localisé par ses coordonnées géométriques, débit d'un cours d'eau, tension d'une ligne de transport d'énergie, type d'arbres dans un verger localisé par sa parcelle, etc. La donnée attributaire qui est une information textuelle, qualitative ou quantitative décrit l'objet géométrique.
- Les logiciels

Les logiciels de SIG assurent les six fonctions suivantes :

- saisie des informations géographiques sous forme numérique (Acquisition) ;
- gestion de base de données (Archivage) ;
- manipulation et interrogation des données géographiques (Analyse) ;
- mise en forme et visualisation (Affichage) ;

- représentation du monde réel (Abstraction) ;
- la prospective (Anticipation).
- Les matériels informatiques

Le traitement des données se fait à l'aide des logiciels sur un ordinateur de bureau ou sur un ordinateur directement sur le terrain. L'ordinateur de terrain avec GPS et laser télémètre permet la cartographie et la collecte des données. La construction de la carte en temps réel et la visualisation de la carte sur le terrain augmentent la productivité et la qualité du résultat.

Exemple du SIG de terrain (technologie Field-Map): matériel qui permet la cartographie (par GPS, laser télémètre, stylo), ainsi que la collecte des données. La carte est créée en temps réel sur le terrain (gain de temps et amélioration de la qualité du travail).

Des systèmes client-serveur en intranet, extranet voire via Internet facilitent ensuite, et de plus en plus, la diffusion des résultats.

- Méthodes et savoir-faire

La mise en oeuvre et l'exploitation d'un SIG ne peut s'envisager sans le respect de certaines règles et procédures propres à chaque organisation. Un SIG fait appel à une connaissance technique et à divers savoir-faire et donc divers métiers qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. Le spécialiste doit mobiliser des compétences en géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection), en analyse des données, des processus et de

modélisation, en traitement statistique, en sémiologie graphique et cartographique, en traitement graphique. Il doit savoir traduire en requêtes informatiques les questions qu'on lui pose.

- Les utilisateurs

Un SIG étant avant tout un outil, c'est son utilisation qui permet d'en exploiter la quintessence. Les SIG s'adressent à une très grande communauté d'utilisateurs depuis ceux qui créent et maintiennent les systèmes, jusqu'aux personnes utilisant dans leur travail quotidien la dimension géographique. Avec l'avènement des SIG sur Internet, la communauté des utilisateurs de SIG s'agrandit de façon importante chaque jour et il est raisonnable de penser qu'à brève échéance, nous serons tous à des niveaux différents des utilisateurs de SIG.

1.4 MODELES DE DONNEES VECTEURS ET RASTER

Les SIG exploitent deux différents types de mode géographiques :

- Le mode vecteur

Un système basé sur le mode vectoriel affiche les données graphiques comme étant des points (stations pluviométriques, etc.), des lignes, des courbes, ou des surfaces (bassin versant, parcelle, etc.) avec des attributs. Ceci voudrait dire qu'il est plus facile de représenter les formes

complexes ou linéaires dans le format vectoriel. La plupart des cartes produites à partir des SIG le sont dans le format vectoriel.

Les données de télédétection doivent être converties avant utilisation dans un SIG en format vectoriel.

Le mode raster

Le format raster des données représente la réalité par des cellules de grilles uniformes d'une résolution spécifique. Chaque carré (ou cellule de grille) couvre une aire géographique donnée et une valeur d'attribut est assignée à la cellule. La cellule de grille est la plus petite unité géographique dans un SIG raster, elle est connue comme 'l'unité cartographique minimale'.

La résolution dépend de la taille de la cellule de la grille, plus la cellule est grande, moins l'information est précise, plus la grille est petite, plus la résolution est grande et plus la base de données est grande parce qu'il y a plus de détails.

Visuellement, les formes et objets géographiques sont représentés par la combinaison de cellule de grille. Ceci signifie que les formes complexes (limites administratives) ou les objets linéaires (traits de côtes) peuvent apparaître non naturels.

La plupart des données de télédétection sont collectées dans le format raster, ce qui veut dire qu'on n'a pas besoin de les convertir avant de les utiliser dans un SIG en format raster.

Les deux schémas suivants (figure 3) montrent la représentation raster et vecteur de la même zone côtière. A noter l'apparence en block de la représentation raster, alors que la représentation en vecteur est faite de points, de lignes et de polygones.

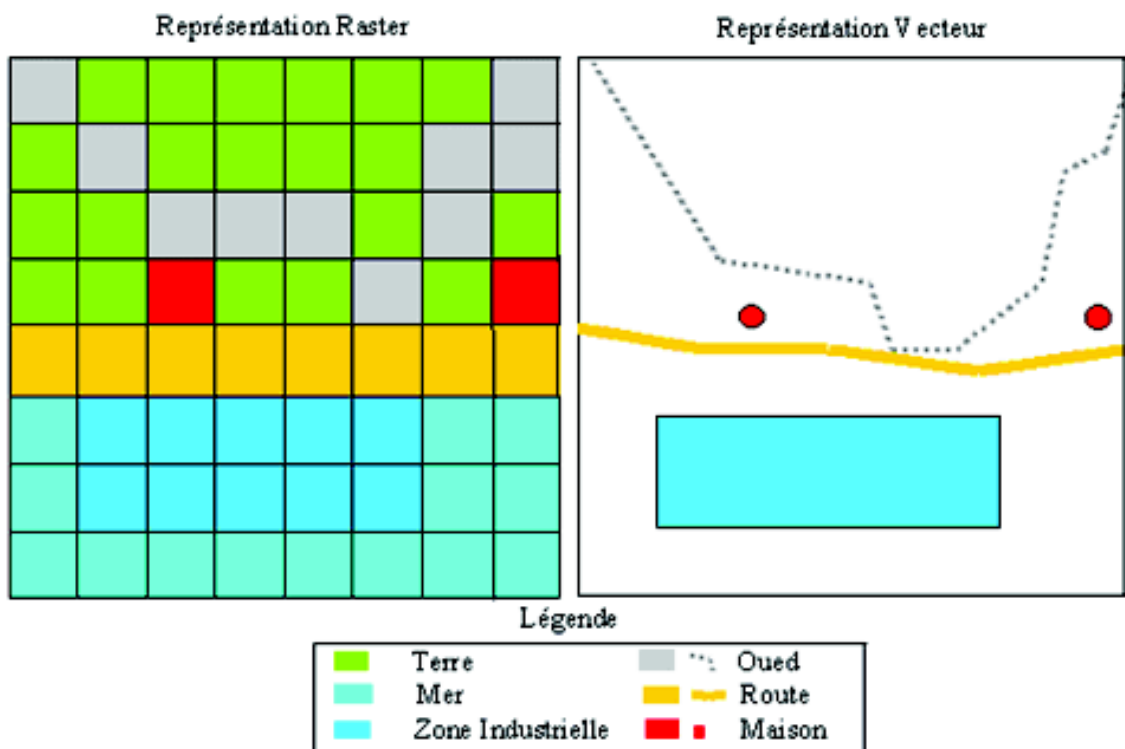


Figure 3 : Représentation des modes raster et vecteur

1.5 FONCTIONNEMENT D'UN SIG

Un SIG stocke les informations concernant le monde réel sous forme de couches thématiques pouvant être reliées les unes aux autres par la géographie. Ce concept,

à la fois simple et puissant a prouvé son efficacité pour résoudre de nombreux problèmes concrets.

Les couches d'informations géographiques peuvent être superposées quelque soient leurs modes de représentations : vecteurs ou raster (**figure 4**) et interrogées en effectuant des croisements entre elles (Lavigne et Magdelaine, 2001).

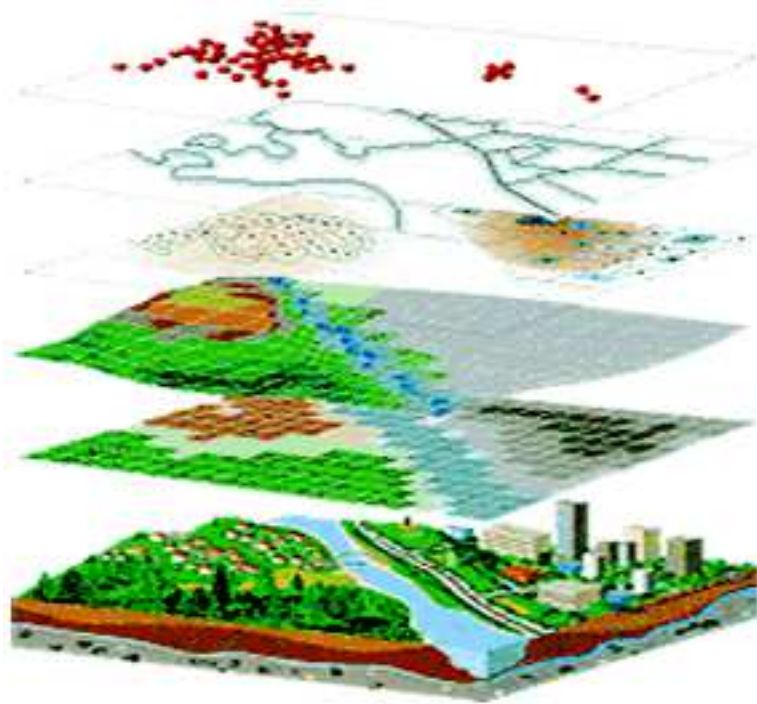


Figure 4 : Représentation du monde réel

La lisibilité de la carte est de ne pas trop la charger, les croisements d'informations ne peuvent guère dépasser 4 ou 5 couches par carte. Au-delà, il faut faire plusieurs cartes.

1.5.1 Les principales fonctions

Le géoréférencement

Dans la plupart des projets SIG, on procède tout d'abord à un découpage géographique de l'espace, qui délimite la zone d'étude. La première étape est de géoréférencer cet espace, c'est à dire le délimiter précisément par des coordonnées cartographiques (ou géographiques). C'est cette conformité qui permettra de superposer des plans de diverses natures. Pour assurer cette superposition, les différentes couches d'informations géographiques doivent avoir le même système de projection (Lavigne et Magdelaine, 2001).

Nous pouvons projeter cette nouvelle image géoréférencée dans le format qui nous intéresse et l'utiliser pour corriger une autre image du même site ou une autre couche (Landry, 2005).

Les systèmes de projections

La Terre est un géoïde (en prenant le niveau moyen des mers), c'est à dire une sphère irrégulière, pour la représenter, il faut donc trouver un modèle mathématique qui correspond le mieux à la surface topographique de la Terre. La surface utilisée est donc un ellipsoïde (dit de révolution).

Les ellipsoïdes de référence sont celui de Newton au 17^{ème}, puis de Clarke dès 1880 et de Hayford depuis 1924.

Afin de représenter cet ellipsoïde sur un plan, on utilise différents systèmes de projections :

- conforme de Mercator : conserve les angles mais altère les surfaces (cartes militaires, de navigation...);
- équivalente de Lambert : conserve les surfaces mais altères les angles (cartes politiques, démographiques...);
- -aphylactique (ni conforme, ni équivalente) qui altère les angles et les surfaces.

La saisie

Avant d'utiliser des données dans un SIG, il est nécessaire de les convertir dans un format informatique. Cette étape essentielle s'appelle digitalisation. Aussi l'information géographique doit contenir une référence géographique explicite (latitude et longitude ou grille de coordonnées nationales).

- La digitalisation

Les SIG modernes sont capables d'automatiser complètement ces tâches pour des projets importants en utilisant la technologie des scanners. D'autres projets moins importants peuvent se contenter d'une phase de digitalisation manuelle.

- La structuration des données spatiales : la topologie

La topologie désigne l'expression des relations entre les objets qui peuvent être calculés et donner naissance à des points d'intersection. Ceci permet d'éviter la répétition d'objets superposés. Une parcelle bordant un oued aura les mêmes sommets que ceux définis pour l'oued.

- **Les métadonnées**

Toute source de données géographiques ne se limite pas à son contenu attributaire et géographique, mais est accompagnée d'informations caractérisant la source elle-même, c'est-à-dire de données sur les données (on les appelle métadonnées).

Elles permettent de renseigner les fichiers numériques sur leur contenu. Elles sont indispensables à la compréhension, l'utilisation durable et au suivi des données. Pour les informations relatives au territoire les métadonnées sont d'autant plus importantes qu'elles permettent de connaître les spécificités de leur dimension spatiale. Elles renseignent ainsi sur les référentiels et systèmes de projection associés, sur les échelles d'application, les formats, etc... (Esri France, 2004).

1.5.2 Questions auxquelles peuvent répondre les SIG (Habert, 2000)

- Qu'est-ce que cela apporte ?
 - les informations sont stockées de façon claire et définitive ;
 - gérer une multiplicité d'informations attributaires sur des objets ;
 - omprendre les phénomènes, prévoir les risques (simulations) ;
 - établir des cartographies rapides ;
 - localiser dans l'espace et dans le temps ;

- réagir rapidement après des événements ayant un impact sur le territoire ;
 - calculer des coûts ou des bénéfices ;
 - associer un plus grand nombre de partenaires aux choix d'aménagement ;
 - fournir des itinéraires, des plans adaptés.
- Quelques exemples de questions
 - quel est l'état des routes sur une commune?
 - qu'est-ce qui a changé depuis 1952 ?
 - quelles sont les parcelles concernées par une inondation éventuelle?
 - quelles sont les zones sensibles en cas d'avalanches ou de glissement de terrain?
 - quel est le chemin le plus rapide pour aller de la caserne des pompiers à l'incendie?
 - que se passe-t-il si une substance toxique se déverse à tel endroit?
 - où implanter des postes de surveillance d'incendie de forêt?
 - trouver les zones favorables à la culture du riz?
 - comment évolue la déforestation en Amazonie?
 - recherche de sites propices à la culture des algues sur la côte atlantique?
 - Les Systèmes d'Informations géographiques vous permettent :
 - de disposer les objets dans un système de référence géoréférencé ;
 - de convertir les objets graphiques d'un système à un autre ;
 - de faciliter la superposition de cartes de sources différentes ;
 - d'extraire tous les objets géographiques situés à une distance donnée d'une route ;
 - de fusionner des objets ayant une caractéristique commune (par exemple : toutes les maisons raccordées à un réseau d'eau potable) ;
 - de déterminer l'itinéraire le plus court pour se rendre à un endroit précis ;
 - de définir des zones en combinant plusieurs critères (par exemple : définir les zones inondables en fonction de la nature du sol, du relief, de la proximité d'une rivière).

1.6 LE RÔLE DES SIG

Le rôle du système d'information est de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives graphiques (vecteur) ou des maillages (raster). À ces primitives sont associées des informations qualitatives telles que la nature (route, voie ferrée, forêt, etc.) ou toute autre information contextuelle.

- Acquisition, archivage, analyse, affichage, abstraction

Organisation des données descriptives et des données géométriques (IAAT, 2003):

- Acquérir revient à alimenter le SIG en données. Les fonctions d'acquisition consistent à entrer d'une part la forme des objets géographiques et d'autre part leurs attributs et relations ;
- Archiver consiste à transférer les données de l'espace de travail vers l'espace d'archivage (disque dur). Cette fonction dépend de l'architecture du logiciel avec la présence intégrée ou non d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) ;
- Analyser permet de répondre aux questions que l'on se pose ;
- Afficher pour produire des cartes de façon automatique, pour percevoir les relations spatiales entre les objets, pour visualiser les données sur les écrans des ordinateurs ;
- Abstraire revient à concevoir un modèle qui organise les données par composants géométriques et par attributs descriptifs ainsi qu'à établir des relations entre les objets.

1.7 MODELES NUMERIQUES D'ALTITUDE

Depuis les années 1990, la puissance des micros ordinateurs a permis le large développement des Modèles Numériques de Terrain. Sous ce vocable on confond souvent l'ensemble de programme permettant de traiter la topographie d'une zone (le MNT, au sens strict) et les altitudes aux nœuds d'un maillage régulier couvrant la zone d'étude (le Modèle Numérique d'Altitude). A partir d'un MNA., le MNT permet de calculer automatiquement tous les paramètres classiques tels que la pente, l'orientation des versants, etc. Il peut également déduire de la topographie et à partir d'un point exutoire donné, retrouver les contours d'un bassin versant, le réseau hydrographique, etc. La plus grande difficulté consistait à digitaliser le relief à partir de supports cartographiques (Laborde, 2000).

Le modèle numérique d'altitude (MNA) offre une représentation numérique du relief d'un territoire généré à partir de données altimétriques (altitude) et planimétriques (rectangulaires ou géographiques).

Un MNA peut être représenté sous différentes formes et suivant son exploitation (Charleux-Demargne, 2001). Les représentations les plus courantes sont les suivantes (figure 5).

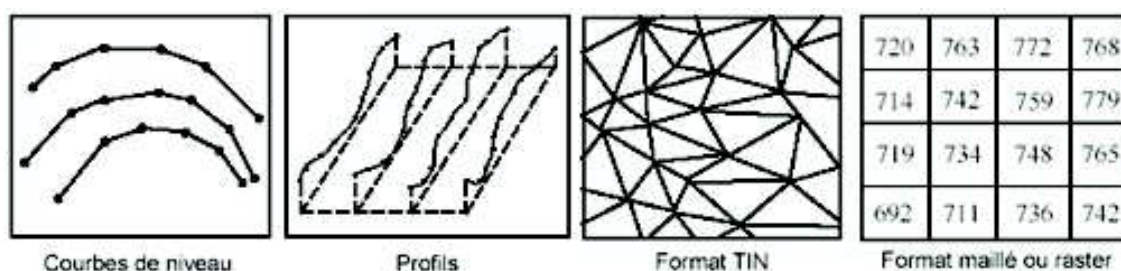


Figure 5 : Les différents formats de MNT

Une nouvelle approche est développée pour la représentation altimétrique fondée sur la Triangulation de Delaunay (TIN), c'est à dire l'approche géométrique des MNT (Rognant, 2000). Le résultat n'est plus une grille régulière, mais un réseau de triangles irréguliers reliant un ensemble de points en nombre fini dont l'altitude est connue. Le MNA est calculé à partir de cet ensemble de points. Comme pour les MNA raster, ces points sont aussi ceux de construction des courbes de niveau. Contrairement au MNA raster, le TIN n'est interpolé qu'à partir des points existants. Il s'agit ici d'une tessellation irrégulière.

A partir de cette approche (TIN), il est possible de déterminer plusieurs attributs du modèle numérique d'altitude tels que des attributs topographiques (élévation, orientation, pente, surface, courbure) qui influencent diverses grandeurs intervenant directement dans les processus d'écoulement(Roche, 1963).

Etant donné, que nous disposons des courbes de niveau à l'échelle 1/50 000, la structure TIN (Triangular Irregular Network) est une adaptation du modèle vectoriel pour la représentation de la topographie (Gatre, 1991 ; Laurini et Thomson, 1992). Ainsi, grâce au SIG, nous avons pu obtenir le Modèle Numérique d'Altitude (MNA) de la zone d'étude et déduire les fichiers dérivés notamment carte hypsométrique, situation géographique, les cartes de répartition spatiale, etc.... à l'aide d'un SIG (ArcGis et GvSig). La projection utilisée dans cette étude est celle de coordonnées kilométriques Lambert.

CONCLUSION

Les cartes ont une place toute particulière au sein d'un SIG. Le processus de réalisation d'une carte avec un Système d'Information Géographique est beaucoup plus souple qu'une carte produite manuelle ou automatisée. Les informations existantes sur support papier peuvent être digitalisées et toutes les autres sources informatiques sont facilement intégrées au sein du SIG.

Les SIG offrent à la cartographie moderne de nouveaux modes d'expression permettant d'accroître de façon significative son rôle pédagogique. Les cartes créées avec un SIG peuvent désormais facilement intégrer des rapports, des vues 3D.

Aujourd'hui, le développement de techniques modernes d'acquisition et de mise à disposition d'informations digitales a rendu possible la représentation à la fois de la topographie du milieu par le biais de modèle numérique d'altitude (MNA) ainsi que la représentation de l'occupation des sols par le biais de photographies aériennes ou de données satellitaires. Ces informations servent de plus en plus à la description des caractéristiques physiques des bassins versants et à la cartographie numérique de leur couverture (Musy, 2005).

CHAPITRE 2 : RESSOURCES EN EAU

INTRODUCTION

La Ressource en eau désigne la quantité d'eau dont dispose, ou peut disposer, un ou un ensemble d'utilisateurs pour couvrir ses besoins. L'eau de la planète est présentée naturellement sous diverses formes : dans l'atmosphère, sur et sous la surface de la Terre, et au sein des océans.

Partout dans le monde, les ressources en eau disponibles s'amenuisent en raison des activités humaines et de facteurs naturels. Même si la population a pris davantage conscience au cours des dix dernières années de la nécessité de mieux gérer et protéger l'eau, les critères économiques et les considérations politiques ont toujours tendance à déterminer la politique de l'eau à tous les niveaux.

Gérer efficacement et équitablement les ressources en eau est l'un des défis les plus importants et qui implique une connaissance aussi parfaite que possible de la disponibilité de la ressource et de sa variabilité dans le temps et dans l'espace. Ainsi, l'eau est menacée par sa rareté, le gaspillage, la pollution et la grande sollicitation des secteurs agricole et industriel (Khelifaoui et Zouini, 2010).

La mesure quantitative et qualitative des éléments du cycle hydrologique et la mesure des autres caractéristiques de l'environnement qui influent sur l'eau constituent une base essentielle pour une gestion efficace de l'eau (Déclaration de Dublin, 1992). De fait, la compréhension et l'analyse du cycle de l'eau sont la base de toute étude et réflexion au sujet de la gestion des eaux (Musy, 2005).

2.1 REPARTITION GLOBALE DE L'EAU

Les ressources en eau de la Terre représentent approximativement 1.386 millions de km³ dont 97% dans les océans et 3 % en eaux douces (eau non salée) sur les continents (figure 6 et tableau 1). La répartition des volumes d'eau douce se décomposent ainsi : 68 % dans les inlandsis et les glaciers, 31 % stockés dans le sol, 0.04% stockés dans l'atmosphère, 0.3% dans l'eau de surface. Les sources d'eau douce de surface, comme les rivières et les lacs, totalisent 93 100 km³, ce qui représente 1/150 d'un pourcent de la quantité totale de l'eau (Gleick, 1996).

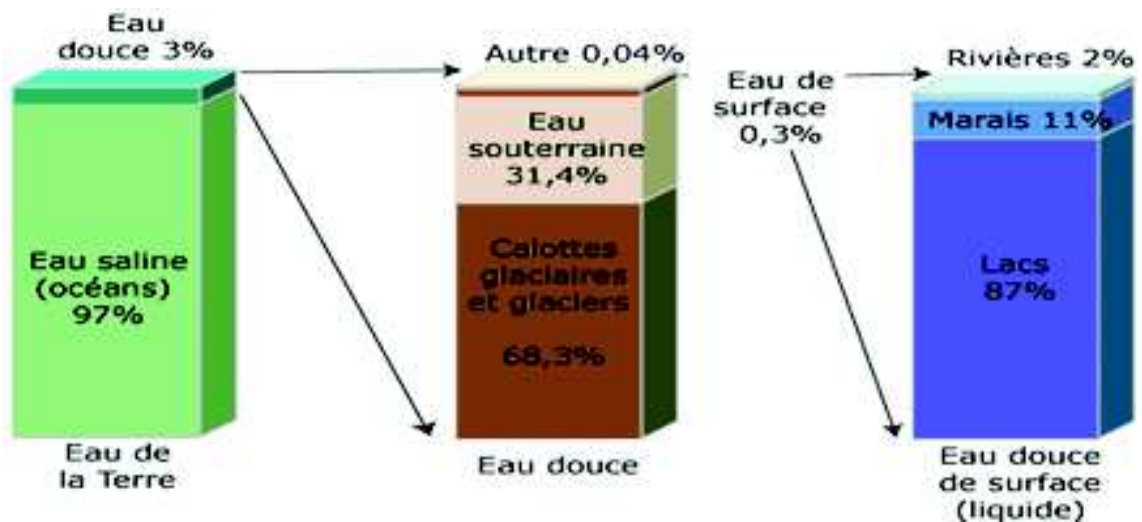


Figure 6 : Répartition globale de l'eau

Tableau 1 : Estimation de la distribution globale de l'eau

Source d'eau	Volume d'eau (km ³)	Volume d'eau (miles ³)	% d'eau douce	% d'eau totale
Océans, mers baies	1.338.000.000	321.000.000	—	96.5 %
Calottes glaciaires, glaciers et neiges éternelles	24.064.000	5.773.000	68.7 %	1.74 %
Eau souterraine	23.400.000	5.614.000	—	1.7 %
douce	10.530.000	2.526.000	30.1 %	0.76 %
saline	12.870.000	3.088.000	—	0.94 %
Humidité du sol	16,500	3,959	0.05 %	0.001 %
Hydrolaccolithe et pergélisol	300,000	71,970	0.86 %	0.022 %
Lacs	176,400	42,320	—	0.013 %
d'eau douce	91,000	21,830	0.26 %	0.007 %
d'eau saline	85,400	20,490	—	0.006 %
Atmosphère	12,900	3,095	0.04 %	0.001 %
Eau marécageuse	11,470	2,752	0.03 %	0.0008 %
Rivières	2,120	509	0.006 %	0.0002 %
Eau biologique	1,120	269	0.003 %	0.0001 %
Total	1.386.000.000	332.500.000	—	100 %

Source Gleick (1996)

2.2 TYPE DE RESSOURCES EN EAU

Dans la nature, on peut signaler d'une part les petites ressources en eau comme l'humidité de l'air et l'humidité du sol que certains animaux et plantes en profitent. Et d'autre part les grandes ressources d'eau dont :

- l'eau de surface (eau des oueds, des lacs et des marais, des étangs et des petites dépressions fermées) ;
- les eaux souterraines (dans les différents magasins aquifères) ;
- l'eau de mer.
- Les eaux superficielles

Les eaux superficielles sont constituées par les eaux des ruisseaux, rivières, étangs, lacs, barrages-réservoirs et glaciers. Mais il ne faut pas oublier que c'est l'eau des précipitations (eau météorique) qui est à l'origine des eaux superficielles, et qu'elles se trouvent en contact étroit avec le sol d'un côté et l'atmosphère de l'autre (Cun, 2003).

Lorsque les précipitations tombent à la surface du sol, une partie de l'eau se déverse dans les lacs et les cours d'eau. Une certaine partie de l'eau provenant de la fonte des neiges et des précipitations s'infiltré dans le sol et percole dans la zone de saturation. Ce processus s'appelle l'alimentation, et les endroits où il se produit s'appellent zones d'alimentation. Cette eau peut finalement réapparaître au-dessus du sol. C'est l'émergence.

- Les eaux souterraines

Lorsque l'eau superficielle pénètre dans le sol, une partie est retenue à la surface des grains de terre (capacité de rétention du sol) et l'autre partie percole en direction du sous-sol sous l'action de la pesanteur. Cette percolation dépend de la perméabilité du terrain et peut se dérouler lentement et régulièrement (perméabilité en petit) ou de façon plus irrégulière, dans des larges fissures ou des cavernes (perméabilité en grand) (Cun, 2003).

De nombreux termes sont utilisés pour décrire la nature et l'étendue des ressources en eau souterraine (figure 7). Le niveau au-dessous duquel tous les interstices sont remplis d'eau s'appelle la surface de saturation. Au-dessus de cette surface se trouve la zone d'aération. Ici, les espaces dans la roche et le sol contiennent à la fois de l'air et de l'eau. L'eau dans cette zone s'appelle l'humidité du sol. Toute la région au-dessous de la surface de saturation est dénommée zone de saturation, et l'eau de cette zone est l'eau souterraine.

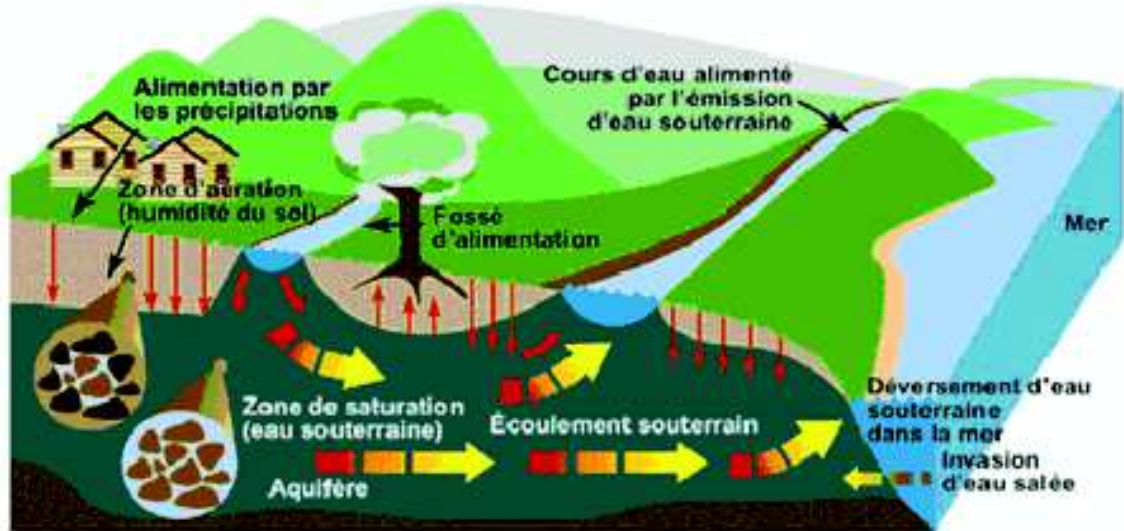


Figure 7 : Écoulement de l'eau souterraine

La circulation de l'eau souterraine fait partie du cycle hydrologique. Les précipitations et d'autres sources d'eau de surface alimentent l'eau souterraine qui se draine constamment, et parfois très lentement, vers son point de déversement. L'eau souterraine peut se déverser dans les cours d'eau, les marais, les lacs et les océans, ou bien son émission peut se présenter sous forme de sources et de puits jaillissants.

L' eau de mer

La mer est une très grande étendue d'eau salée, de taille plus modeste qu'un océan, mais plus vaste qu'un lac salé. Il existe plusieurs types de mers, en fonction de leur environnement et de la communication qu'elles ont avec un océan (très vastes bassins d'eau qui séparent les continents et constituent la majeure partie de l'océan mondial c'est-à-dire l'ensemble des océans et des mers du globe).

2.3 LE CYCLE DE L'EAU

2.3.1 Représentation du cycle de l'eau

L'eau est la source principale et originale de toute vie. Elle se présente, dans la nature, sous trois états :

- Solide : neige et glace ;
- Liquide : eau chimiquement pure ou chargée en solutés ;
- Gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.

Le changement de phase de l'eau dépend essentiellement de la température et de la pression mais aussi du degré de pollution de l'atmosphère. La figure 8 donne les différentes

conditions de pression et de température pour les trois états de l'eau, ainsi que les transformations de phase (Musy, 2005).

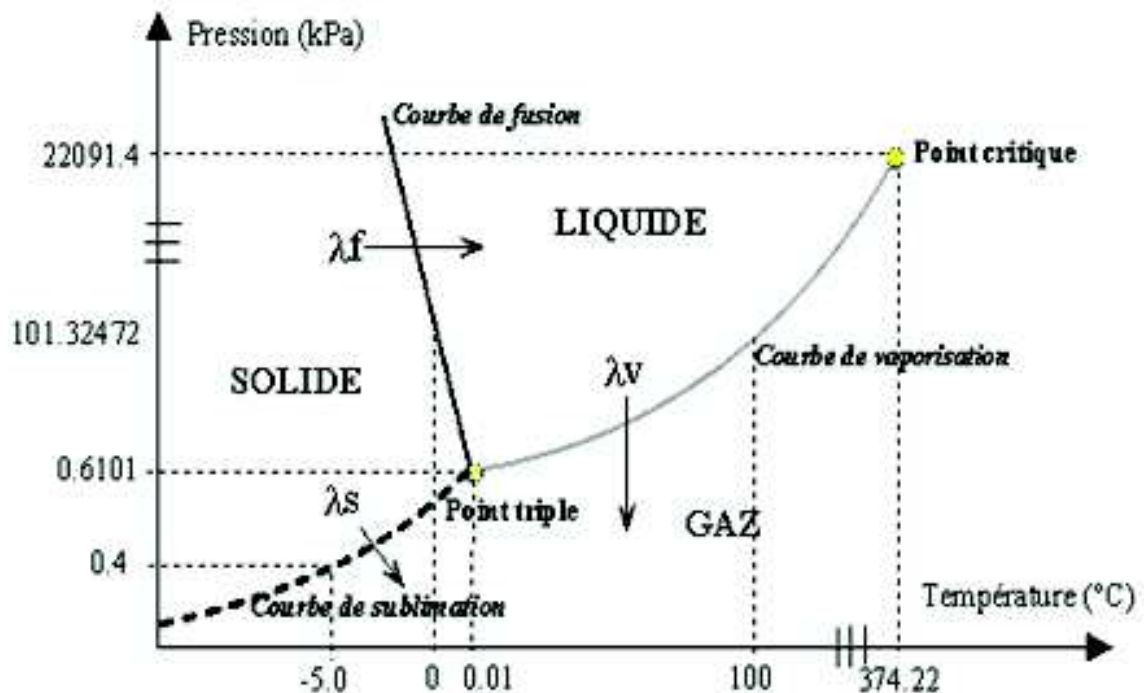


Figure 8 : Diagramme de phase de l'eau (Musy, 2005)

Schématiquement, l'eau évolue entre trois secteurs : les océans (l'hydrosphère), l'atmosphère et les sols (lithosphère). La Terre recevant l'énergie solaire, l'hydrosphère chauffée s'évapore, conduisant à la présence d'eau dans l'atmosphère. Cette eau, suite à un refroidissement de l'air, se condense en gouttes ou cristaux de glace et se retrouve précipitée sous forme de pluie, neige ou grêle sur la lithosphère à la surface de laquelle approximativement $\frac{1}{4}$ pénètre, $\frac{1}{4}$ ruisselle. La moitié restante s'évapore à son tour (Cun, 2003).

L'eau suit un cycle à la surface du globe comme le montre la figure 9 et comprend différents processus :

Les précipitations

Les précipitations constituent la principale « entrée » des principaux systèmes hydrologiques continentaux que sont les bassins versants. Ce sont l'ensemble des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (brune, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,....). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression (Roche, 1963).

Les précipitations sont un des processus hydrologiques les plus variables et d'autre part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et ceci quelle que soit l'échelle spatiale prise en compte (régionale, locale, etc.).

Les météorologistes ont introduit une notion nouvelle 'l'efficacité des précipitations'. Il s'agit en fait d'évaluer la quantité d'eau qui pénétrera réellement dans le sol. Cette quantité dépend du terrain, de sa pente, de sa perméabilité, du type de végétation, de la quantité de pluie et de son intensité. En effet lors d'une forte pluie sur un terrain sans végétation

et en pente, l'eau s'infiltré peu et ruisselle. Elle est perdue pour la végétation (Beuraud et Poitevin, nd) ;

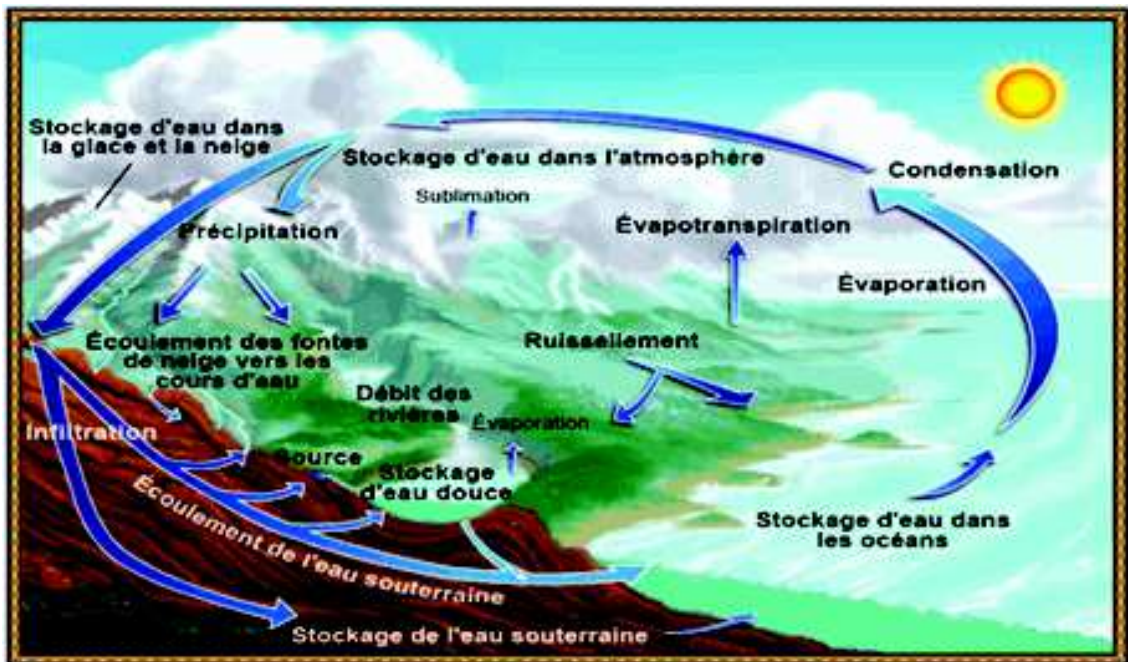


Figure 9 : Le cycle de l'eau

(Illustration de Evans, USGS :<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html>)

- La condensation

Il s'agit du passage de l'eau de l'état de vapeur à l'état liquide. La vapeur d'eau est invisible et lors de la condensation apparaît un nuage ou de la rosée. Cette source d'eau bien plus faible que la précédente joue un rôle important en agriculture. En effet dans certains pays chauds, l'apport d'eau par la rosée peut suffire aux plantes pour passer le cap difficile des mois d'été ;

- L'évapotranspiration

C'est le phénomène d'évaporation du sol auquel s'ajoute la transpiration des végétaux (passage de l'eau liquide à l'état gazeux). Il varie suivant la température et l'état du sol. Grâce à ce phénomène, la plante régule sa température. Quand il fait chaud et que le sol est presque sec, elle conserve le plus possible l'eau en refermant ses stomates, le phénomène de transpiration est donc atténué ;

- L'infiltration

Mouvement de l'eau qui pénètre dans le sol par l'ensemble de minuscules fissures. Ce phénomène a lieu dans le premier mètre sous la surface de la terre. Cette partie du sol constitue la zone de pompage des racines ;

Le drainage : Mouvement de l'eau qui s'enfonce sans être stoppée dans les profondeurs du sol pour alimenter les nappes phréatiques et les réseaux souterrains. Ce mouvement alimente les réserves d'eau profondes qui peuvent être utilisées par pompage pour l'irrigation ;

- Le ruissellement

Lorsque le sol arrive à saturation d'eau, il ne peut plus absorber l'eau de surface qui va donc ruisseler, c'est à dire s'écouler à la surface car elle ne pourra plus s'infiltrer dans le sol. Cet excès d'eau peut avoir des conséquences plus ou moins importantes (inondations dans les cas extrêmes, dégradation du sol qui devient moins stable...).

Le ruissellement se produit aussi sur un terrain trop sec. Dans ce cas le sol est très compact et comporte seulement de grosses fissures en surface, et l'eau ne peut plus s'infiltrer.

2.3.2 Le cycle de l'eau à l'échelle d'un bassin versant

Le bassin versant est défini comme la totalité de la surface topographique drainée par un cours d'eau et ses affluents à l'amont, jusqu'à la ligne de partage des eaux ou ligne de crête (Bremond, 2007).

- **Bilan hydrologique**

Le bilan hydrologique permet de quantifier la lame infiltrée et la lame ruisselée, qui traduit l'importance des ressources en eau souterraines et superficielles disponibles dans le bassin versant.

Il est intéressant de noter que dans chacune des phases on retrouve respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et parfois un changement d'état. Il s'ensuit que l'estimation des quantités d'eau passant par chacune des étapes du cycle hydrologique (figure 10), peut se faire à l'aide d'une équation appelée "*hydrologique*" qui est le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps.

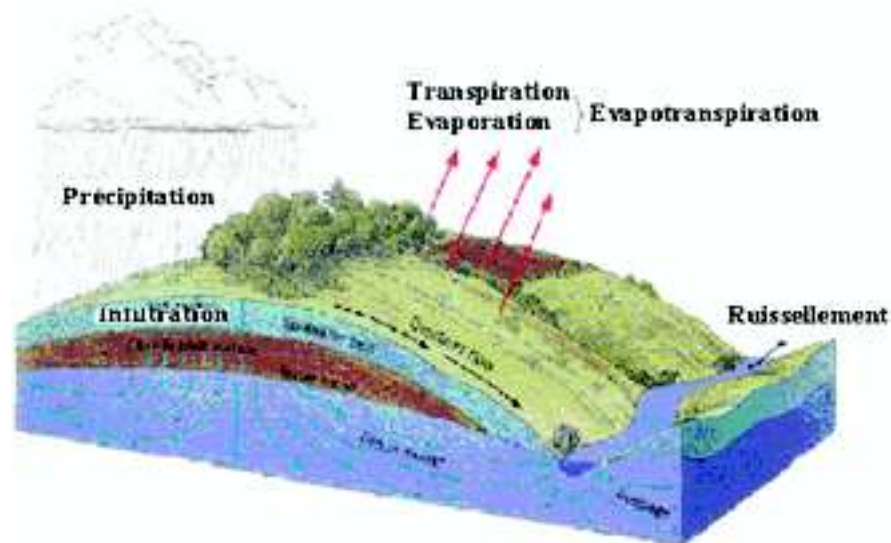


Figure10 :Cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant

2.4 LES LOIS DE LA PLUVIOSITE

L'expérience a montré qu'il était acceptable d'utiliser quelques lois empiriques résumant les tendances générales tirées de l'analyse de nombreux relevés pluviométriques.

- **Relation entre les précipitations et le relief**

Les précipitations augmentent en général avec l'altitude. L'augmentation de précipitations pour un mètre d'élévation s'appelle gradient hypsométrique de précipitations.

Le gradient hypsométrique est positif jusqu'à une certaine altitude ; au-delà de celle-ci il change de signe. Le point où cela se produit s'appelle 'point' critique d'inversion. La hauteur de ce point dépend de plusieurs facteurs, comme l'élévation des terrains avoisinants, l'orientation de la montagne, la proximité de l'océan, etc.

- Influence de la pente de l'orientation des versants montagneux

La quantité d'eau reçue par une surface inclinée sera différente de celle qu'aurait interceptée la projection horizontale de cette surface. Elle est supérieure sur un versant exposé aux vents pluvieux et inférieure sur le versant sous le vent.

- Loi de l'éloignement de la mer

Les systèmes nuageux 's'usant' au fur et à mesure qu'ils s'avancent à l'intérieur des continents, les précipitations doivent aller en décroissant.

2.5 FACTEURS QUANTITATIFS ET QUALITATIFS

L'eau est rare et vulnérable, cette rareté relative tient ainsi non seulement aux facteurs quantitatifs tels que son inégale distribution spatiale ou son inaccessibilité dans certaines régions, mais aussi aux caractéristiques qualitatives : si l'eau est une denrée rare, c'est certes souvent à cause de la faiblesse des stocks disponibles, mais c'est aussi en raison des pollutions qui affectent la qualité de la ressource, l'eau est souvent rare mais plus rare encore est l'eau de bonne qualité. Cette qualité est tout particulièrement influencée par les pressions exercées par les multiples activités humaines. Rareté quantitative et rareté qualitative dépendent, d'une part, des spécificités des ressources en eau et, d'autre part, des usages de l'Homme (Mendieta, 2005).

L'eau atmosphérique devrait ressembler à de l'eau distillée mais elle contient des gaz dissous (diazote, dioxygène et CO₂), des dérivés de l'azote (provenant des réactions produites par des décharges électriques dans l'atmosphère, (principalement des oxydes d'azote NO_x) et des polluants divers gazeux, provenant de foyers de combustion industriels ou domestiques, minéraux, pouvant être naturels (poussières du sol), artificiels (fumées d'usines), radioactifs et organiques (Cun, 2003).

La pollution peut concerner aussi bien les eaux superficielles que les eaux souterraines. Les eaux de surface sont en général plus sensibles aux pollutions et leurs protections très délicates. Au contraire, grâce ou rôle auto-épuration de la zone non saturée, les eaux souterraines se trouvent plus à l'abri de cette pollution.

La gestion de l'eau doit être assurée de façon intégrée, à l'échelle d'une unité naturelle qu'est le bassin hydrographique. On doit donc à la fois mettre en place les instruments de cette gestion par bassin, mais aussi l'ensemble des outils réglementaires, nécessaires pour assurer la protection quantitative et qualitative des ressources en protégeant au mieux les écosystèmes.

2.6 RESSOURCES EN EAUX EN ALGERIE

Depuis 1993, l'Algérie s'est engagée dans une réforme de sa politique de l'eau. La nouvelle politique est basée sur les principes suivants : Prise en compte de la dimension économique

de l'eau, rareté et vulnérabilité de la ressource, nécessité d'une gestion intégrée au sein d'unités naturelles, concertation. C'est ainsi qu'a été amendé en juin 1996, le Code de l'Eau et qu'ont été créés, depuis Août 1996 cinq Agences de Bassin Hydrographique et cinq comités de Bassin, couvrant la totalité du territoire (Kherraz, nd).

Un contexte physique peu favorable : le territoire algérien couvre une superficie de près de 2,4 millions de km², mais 90% de cette étendue correspondent à un désert où les précipitations sont quasi-nulles. Dans cette partie du territoire, les ressources en eau superficielles sont très faibles et limitées essentiellement à la partie du flanc septentrional de l'Atlas ; les ressources souterraines y sont par contre abondantes mais sont très faiblement renouvelables (nappes du Sahara septentrional). Le potentiel des ressources en eau renouvelables est localisé dans le Nord de l'Algérie qui englobe les bassins tributaires de la Méditerranée et les bassins fermés des Hauts Plateaux (CATE, 2000).

Le pays divisé en cinq bassins hydrographiques regroupe les 19 bassins versants existants. Les ressources en eau superficielle renouvelables internes totalisent environ 9,8 km³/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par la surface, ne renferme que 0.6 km³.

Les ressources en eaux souterraines renouvelables contenues dans les nappes du nord du pays sont estimées à près de 1.5 km³/an. Ces nappes sont alimentées essentiellement par les précipitations dont la répartition demeure irrégulière à la fois dans le temps et dans l'espace. Le sud du pays se caractérise par l'existence de ressources en eau souterraines très importantes provenant des nappes du continental intercalaire et du complexe terminal. Si l'on considère qu'il n'existe pas de partie commune entre eaux de surface et eaux souterraines, les ressources totales renouvelables internes s'élèvent à 11.3 km³/an. Les ressources exploitables sont évaluées à 7.9 km³/an (FAO, 2005).

Les ressources en eau prélevées en 2000 sont estimées à 6,074 milliards de m³, dont 3,938 milliards destinés à l'irrigation (65%), 1,335 milliard aux usages domestiques (22%) et 801 millions à l'industrie (13%).

La capacité totale initiale des barrages des cinq bassins hydrographiques était d'environ de 5 km³ en 2000, mais il est estimé qu'avec l'envasement cette capacité a diminué de plus de 25 %. En 2003, la capacité totale était estimée à environ 6 km³ (FAO, 2005).

Globalement, la capacité de mobilisation installée est répartie entre les barrages (21,4 %), les forages (72,6%) et les sources (6,0%) (CATE, 2000).

Les ressources en eau superficielles décroissent du Nord au Sud, au fur et à mesure que croissent les ressources en eau souterraines. La pluviométrie varie de 200 mm par an sur les Hauts-Plateaux steppiques à 1600 mm par an sur les reliefs de l'Atlas tellien en bordure de la Méditerranée (ANRH, 1993). En plus de cette variation Nord-Sud, on note également une augmentation de ces précipitations d'Ouest en Est.

La pollution des ressources en eau commence à atteindre des proportions inquiétantes notamment dans la région tellienne où se trouve la plus grande partie de nos ressources en eau. La disponibilité en eau déjà faible risque de l'être davantage du fait de cette pollution des eaux usées mais également des pollutions chimiques (industrie et agriculture) (CATE, 2000).

2.7 RESSOURCES EN EAU PAR UTILISATION DU SIG

La compréhension des modalités de la reconstitution de la ressource en eau suppose une bonne connaissance de la structuration des champs de précipitations dans l'espace étudié (Humbert et al, 1993).

Les méthodes classiques de cartographie pluviométrique cèdent aujourd'hui leur place à la cartographie assistée par ordinateur. Les moyens de calcul et les outils, actuellement disponibles, permettent le traitement de considérables masses de données d'observation ainsi que leur représentation de façon objective et assez rapide.

Pour substituer à l'élaboration manuelle de la carte pluviométrique une méthode automatique et opérationnelle, il est nécessaire de rationaliser les différentes étapes de la cartographie (Bénichou et Le Breton, 1987). La prise en compte quantitative du « paysage » topographique environnant chaque point de mesure permet de reconstituer l'ensemble du champ pluviométrique.

Les méthodes d'analyse de données et de cartographie automatique sont utilisées pour le passage d'une information mesurée, ponctuelle et brute, à une information traitée, interpolée et numérisée. Celle-ci est indispensable pour une connaissance valable et continuellement mise à jour des éléments du climat et de la ressource en eau (Mebarki, 2005).

Ces informations, à référence spatio-temporelle, sont susceptibles d'être utilisées dans des systèmes d'informations géographiques (Touazi, 2001), outils devenus indispensables dans divers domaines d'étude et d'aide à la décision (eau, agriculture, aménagement du territoire, environnement...).

CONCLUSION

L'eau est essentielle à la survie et au bien-être de l'homme et est indispensable au fonctionnement de nombreux secteurs. La gestion des ressources en eau devrait davantage veiller à accroître les ressources naturelles existantes et à réduire la demande et les pertes en eau.

En Algérie, le problème de l'eau a commencé à se poser avec acuité durant cette dernière décennie qui est caractérisée par une sécheresse persistante provoquant la diminution des ressources en eau. Sur le plan pluviométrique, celui-ci se caractérise par l'insuffisance des précipitations et leur irrégularité dans l'espace et dans le temps. Les ressources en eau deviennent de plus en plus limitées. Une meilleure gestion de l'eau s'impose à cause de son insuffisance et du coût élevé de sa mobilisation.

Bien gérer la problématique de l'eau, implique une connaissance aussi parfaite que possible de la disponibilité de la ressource et de sa variabilité dans le temps et dans l'espace. Les progrès récents dans le domaine des SIG représentent un atout considérable dans la recherche d'une gestion appropriée des ressources en eau. Encore faut-il que les utilisateurs soient en mesure d'y avoir accès et d'en assurer la gestion et l'entretien, notamment pour ce qui concerne la collecte de l'information de base.

DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE 3 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES, GEOLOGIQUE ET RESSOURCES EN EAU DE LA REGION

I - CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à une description générale du bassin versant de la Soummam afin de donner les indications géographiques, géomorphologiques, géologique et hydrogéologiques, bases indispensables à la compréhension future des mécanismes hydrologiques. En effet l'altitude, les cours d'eau et la forme d'un bassin versant reliées à la lithologie renseignent sur le type de réponse hydrologique du bassin.

Aussi, l'ensemble des principales caractéristiques physiographiques qui jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique des cours d'eau, a une forte influence sur la répartition spatio-temporelle des précipitations et des écoulements au sein du bassin étudié.

I.3.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE DU bassin versant de la Soummam

Le bassin versant de la Soummam, objet de la présente étude, portant le n° 15 selon la codification de l'ANRH est subdivisé en 10 sous bassins versants. Il est situé dans la partie Nord-Est de l'Algérie (figure 11), entre les méridiens 3° 38' et 5° 38' et les parallèles de 35° 45' et 36° 45' et, du point de vue distance à environ 100 et 200 Km respectivement au Sud et à l'Est de la capitale Alger.

Le bassin couvre une superficie de 9125 Km² de forme irrégulièrement étirée dans la direction Est-Ouest et accède à la Méditerranée par le golf de Béjaïa.

Il est limité par les chaînes montagneuses de Djurdjura et ses contreforts qui s'étendent jusqu'à la mer au Nord, les contreforts du mont du Hodna au Sud, les chaînes des Babors et le plateau de Sétif à l'Est et le plateau de Bouira à l'Ouest.

La population dans la région d'étude est estimée à 1.933.610 habitants (recensement de l'ONS en 1998) répartie sur quatre wilayates en partie : Béjaïa, Bouira, Sétif et Bordj Bou Arreridj.

Le bassin de la Soummam compte 106 communes regroupant 397 agglomérations. Le tableau 2 illustre la répartition de ces communes par wilaya relevant du bassin :

Wilaya	Nombre de communes relevant du bassin	Nombre d'agglomérations	Population 1998 (hab.)		Population 2020 (hab.)		Superficie des communes relevant du bassin (Km ²)	Densité (Hab/ Km ²)
			Agglomérée	Eparse	Agglomérée	Eparse		
Béjaïa	35/39*	157	570.068	64.938	827.803	94.297	2 232	285
Sétif	27/30	125	553.251	135.547	944.317	231.359	3 040	227
Bouira	24/45	50	270.101	116.742	378.865	163.752	2 332	166
BBA	20/34	65	159.911	63.052	274.119	108.084	2 658	84
Total	106	397	1.933.610		3.022.596		10.262	762

Tableau 2 : Communes et agglomérations relevant du bassin de la Soummam

Source ABH (2003)

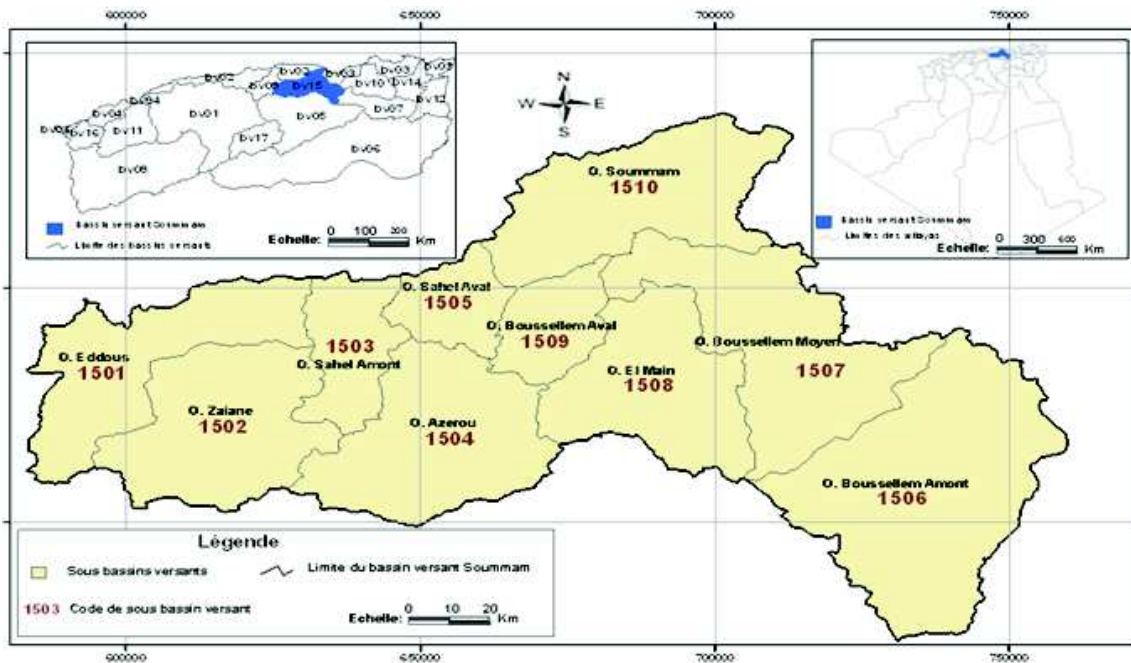


Figure 11 : Situation géographique du bassin versant de la Soummam

Nous constatons d'après le tableau 01 que la population est concentrée dans les deux wilayas : Sétif et Béjaïa qui totalisent une population de 1.323.804 habitants, soit 68 % de la population total du bassin. La densité de la population dans le bassin est de 762 habitants par Km². Les plus fortes densités de la population sont enregistrées au niveau des wilayas de Béjaïa et Sétif (512 habitants par Km²).

I.3.2 LES GRANDS TRAITES MORPHOLOGIQUES

Le relief de la Soummam (cf. figure 42, page 107) est très varié et les principales unités morphologiques du Nord au Sud sont:

La chaîne du Djurdjura

C'est une chaîne marquante dans la structure de la haute Kabylie. Elle s'élève abruptement au Nord de Bouira à la hauteur de 2123m pour atteindre sa hauteur maximale près de M'Chedellah, (Lala Khadîdja 2308m). Elle se termine par la chaîne de Gouraya et son pittoresque Cap Carbon dans le golf de Béjaïa.

La vallée de la Soummam

La vallée de la Soummam est un vaste couloir à fond plat situé entre le Djurdjura et les Bibans dans le cours supérieur, et entre la haute et la basse Kabylie dans le cours inférieur.

Elle pénètre dans le bassin du côté Ouest sous le nom du plateau de Bouira, faisant suite à la plaine des Arib. Vers l'Est, la vallée rétrécie, tourne au Nord-Ouest et disparaît presque près de Sidi Aïch. De nouveau, elle s'élargit graduellement jusqu'au golf de Béjaïa.

- **La chaîne des Bibans**

D'orientation générale Est-Ouest, cette chaîne pénètre dans le bassin de la Soummam près de Sour El Ghozlane et s'étend vers Dj. Anechar (1415m) en passant par Azerou N'Said (1283m). Une ramification importante de la chaîne s'en sépare près de Guenzat en direction de Dj. Es-Sarsara, (1487m) pour atteindre Dj. Anini (1596m).

- **La chaîne de la basse Kabylie**

A l'Est du bassin, apparaît une chaîne de montagnes considérable; c'est la chaîne de la basse Kabylie. Cette chaîne se situe au Nord-Est du cours aval du Boussellem et est constituée d'une série de crêtes différemment orientées. Sa hauteur moyenne varie entre 1200 et 2000m et atteint son maximum aux Babors (2004m).

- **La chaîne du sud**

Ce sont des crêtes de petites tailles qui séparent les terrains montagneux de l'Atlas tellien de la plaine du Hodna (Dj. Dira, Dj. Choukchot et Dj. Mansoura).

I.3.3 ETUDE GEOMORPHOLOGIQUE DU BASSIN VERANT DE LA SOUMMAM

Les différents types de paramètres géomorphologiques ont pour but la quantification des facteurs caractéristiques du milieu physique d'un bassin versant qui sont d'une importance décisive sur le régime d'écoulement des eaux.

I.3.3.1 Paramètres géomorphologiques

- Paramètres géométriques
- Surface :

Le bassin versant étant l'aire de réception des précipitations et d'alimentation des cours d'eau, les débits vont donc être en partie reliés à sa surface. Celle-ci correspond à l'aire délimitée par l'ensemble des points les plus hauts qui constituent la ligne de partage des eaux. La surface (A) du bassin versant, exprimée en km^2 , peut être déterminée à l'aide d'un planimètre ou mieux par les techniques de la digitalisation.

Le périmètre représente toutes les irrégularités du contour ou de la limite du bassin versant, il est exprimé en km. Le contour du bassin est constitué par une ligne joignant tous les points les plus élevés. Le périmètre (P) peut être mesuré à l'aide d'un curvimètre ou automatiquement par des logiciels de cartographie (Dubreuil, 1974).

Les mesures obtenues par calcul de A et P sont respectivement de 9125 km^2 et 530 km.

- Les paramètres de forme

La forme d'un bassin versant a une influence directe sur les modalités des écoulements superficiels vis-à-vis d'une averse. En effet, le temps de concentration des eaux pour un bassin de forme allongée est plus long que pour un bassin de forme ramassée, ceci en

raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants et ce qui favorise l'infiltration aux dépens du ruissellement.

Il existe différents indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, nous les citons comme suit :

L'intérêt essentiel du périmètre est de pouvoir calculer l'indice de compacité. Dubreuil (1974) a fait remarquer que cet indice sert à mesurer la compacité du bassin, c'est-à-dire qu'il est sensé rendre compte de la plus ou moins grande vitesse de concentration à l'exutoire des eaux de ruissellement en provenance des diverses parties du bassin, à savoir le temps de concentration.

Cet indice compare le périmètre P (km) du bassin considéré au périmètre du cercle ayant la même superficie A (km²). Il est déterminé par la relation suivante :

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

$$D'où : K_c = 1,55$$

Sachant que :

$$0 < K_c < 1 \quad \text{Bassin parfaitement circulaire.}$$

$$1 < K_c < 1,128 \quad \text{Bassin carré}$$

$$1,128 < K_c < 3 \quad \text{Bassin allongé.}$$

Nous pouvons donc conclure que le bassin versant de la Soummam présente une forme allongée, ce qui implique un temps de concentration plus long.

La notion de rectangle équivalent ou rectangle de Gravelius, introduite par Roche (1963), permet de comparer les bassins versants entre eux, en ce qui concerne l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

Le rectangle équivalent se définit comme étant le rectangle de largeur (l) et de longueur (L) qui a la même superficie que le bassin versant étudié. Les côtés du rectangle peuvent être calculés à partir des formules suivantes :

La longueur (L) :

$$L = K_c \sqrt{A} \left[1 + \sqrt{1 - (1,12K_c)^2} \right] / 1,12$$

$$D'où : L = 228,78 \text{ km}$$

La largeur (l) :

$$l = A/L$$

$$D'où : l = 39,89 \text{ km}$$

Ces valeurs confirment bien l'allongement du bassin et par conséquent un temps de concentration des eaux assez long.

L'élanement est le rapport entre le diamètre d'un cercle ayant la même superficie que le bassin versant et la longueur maximale entre l'embouchure et le point le plus éloigné du bassin suivant l'oued principal. Ce coefficient est proche de 1 pour un bassin plat.

L'élanement est donné par la formule suivante :

$$R_e = 1.128 \sqrt{\frac{A}{L_m}}$$

Avec A : Superficie du bassin en km^2 .

L_m : Longueur ou distance entre l'embouchure et le point le plus éloigné du bassin suivant l'oued principal. Dans notre cas :

$$R_e = 1.25 \text{ km}$$

Nous concluons donc que le bassin de la Soummam est de forme plate.

Paramètres de relief

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement. Le relief se détermine lui aussi au moyen d'indices ou de caractéristiques suivants.

La courbe hypsométrique :

Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle exprime ainsi la superficie du bassin au-delà d'une certaine altitude (représentée en ordonnée) et porte en abscisse les pourcentages cumulés des superficies A_i obtenues par carroyage Lambert (tableau 3).

A_i : maille carrée de 1 cm^2 de surface soit 25 km^2 à une échelle au 1 / 500 000

Tableau 3 : Répartition hypsométrique du bassin versant de la Soummam

Classes des altitudes	$A_i (\text{cm}^2)$	H_i	$A_i H_i$	$A_c \%$	$A_c (\text{Km}^2)$
2 – 200	15	100	1500	100,00	9125,00
200 – 400	29	300	8700	95,88	8749,05
400 – 600	57	500	2800	87,91	8021,79
600 – 800	73	700	55100	72,25	6592,81
800 – 1000	125	900	112500	52,19	4762,34
1000 – 1200	44	1100	48400	17,86	1629,73
1200 – 1400	11	1300	14300	5,77	526,51
1400 – 1600	7	1500	10500	2,73	249,11
1600 – 1800	2	1700	3400	0,82	74,83
1800 – 2000	0	1900	0	0,27	24,64
2000 – 2200	0	2100	0	0,27	24,64
2200 – 2400	1	2300	2300	0,27	24,64
Somme	364		285200		

Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin. Elles peuvent en outre servir à la détermination de la pluie moyenne sur un bassin versant et donnent des indications quant au comportement hydrologique et hydraulique du bassin et de son système de drainage (Musy, 2005).

Nous remarquons que la tranche d'altitude supérieures à 1400 m (figure 12), est très peu étendue dans le bassin, elle correspond à des massifs montagneux importants et seules les chaînes montagneuses du Djurdjura dépassent 2300 m. Les zones d'altitude comprises entre 800 et 1000 m, couvrent 4762,34 Km², soit 52,19 % de la superficie totale, elles sont réparties dans le Sud et Sud-Est du bassin. La tranche d'altitude inférieure à 200 m correspond à la vallée de la Soummam

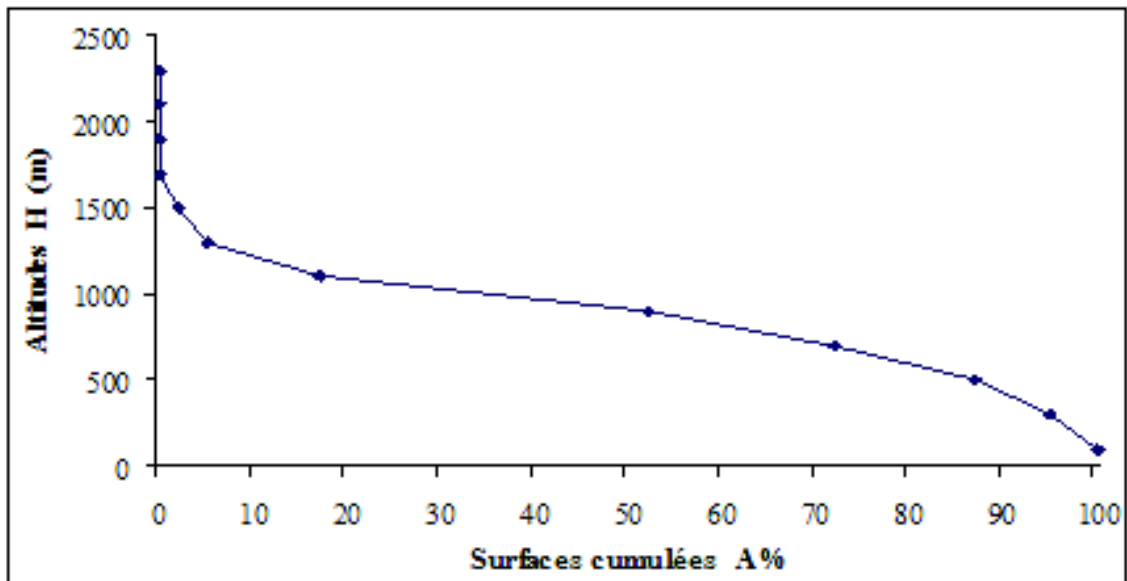


Figure 12 : Courbe hypsométrique

C aractéristiques des altitudes

Altitude moyenne : elle est obtenue par la relation suivante :

$$\overline{H}_i = \frac{\sum A_i H_i}{\sum A_i}$$

$$H_{moy} = 784m$$

- Altitude la plus fréquente : le tableau 3 montre que l'altitude la plus fréquente est comprise entre 800 et 1000m, elle est en moyenne de 900m.
- Altitude de fréquence ½ : Elle correspond à la médiane de la courbe hypsométrique et permet d'avoir une idée sur l'asymétrie du relief.

$$H_{\frac{1}{2}} = 725m$$

Nous remarquons que l'altitude de fréquence ½ est inférieure à l'altitude moyenne. Le bassin présente donc une légère dissymétrie vers les faibles altitudes.

- Altitude maximale et altitude minimale : ce sont les points culminants et le plus bas au niveau de l'exutoire du bassin versant. Elles sont directement obtenues sur cartes topographiques :

$$H_{\max} = 2308m$$

$$H_{\min} = 2m$$

P entes

- Les indices de pente : le but de ces indices est de caractériser les pentes d'un bassin et de permettre des comparaisons et des classifications. Les indices de pente se déterminent à partir de la connaissance de la répartition hypsométrique sur le bassin (Dubreuil, 1974).
- Indice de pente globale : Il se détermine à partir de la pente de la courbe hypsométrique. C'est le rapport de la différence des altitudes de fréquence de 5 % et 95 % par la longueur de rectangle équivalent.

$$I_{\bar{g}} = D / L_{r\bar{g}}$$

$$I_{\bar{g}} = 0.46\%$$

Le bassin versant de la Soummam présente une pente relativement faible pouvant ainsi favoriser l'infiltration au dépend du ruissellement.

I.3.3.2 Paramètres hydrographiques

- Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Les oueds et leurs affluents constituent son squelette hydrographique fondamental (Laborde, 2000).

- Le chevelu hydrographique

L'étude du chevelu hydrographique sert surtout à comparer les sous bassins entre eux.

le rapport de confluence est le quotient du nombre de thalwegs d'ordre x par celui des thalwegs d'ordre (X+1) soit :

$$R_c = N_x / N_{x+1}$$

le rapport de longueur est le quotient de la longueur moyenne des talwegs d'ordre (X+1), par celui des thalwegs d'ordre x :

$$Rl = l_{x+1} / l_x$$

L_x : Longueur moyenne des talwegs d'ordre donné.

- la densité de drainage

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. En effet, les secteurs situés en zones de roches perméables ont en général des densités de drainage faibles, alors que les secteurs de roches imperméables ont des densités plus élevées.

Les conditions climatiques jouent également un rôle important : les climats ayant des précipitations réparties également tout au long de l'année auront des densités de drainage plus faibles que les régions à climat très contrasté comme les zones semi-arides.

La densité de drainage, introduite par Horton, est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant :

$$D_d = \sum \frac{L_x}{A}$$

Avec :

D_d : Densité de drainage (km/km²) ;

L_x : Longueur totale cumulée des talwegs de l'ordre x (km) ;

A : Surface du bassin (km²).

$$D_d = 0.62$$

Ce résultat indique que le bassin versant est assez bien drainé.

Le réseau hydrographique du bassin de la Soummam est très développé (figure 14) et compte 09 principaux oueds (figure 13) totalisant une longueur de 726 km. Le plus long est de 226 km (Oued Soummam) et le plus court est de 23 km (Oued O'Khriss).

Le principal système de drainage du bassin de la Soummam comprend vers l'Ouest, l'Oued Sahel et ses affluents, et vers l'Est, l'Oued Boussellem et ses affluents. Ces deux Oueds se réunissent près d'Akbou pour former l'Oued Soummam qui se jette dans la Méditerranée.

A sa confluence avec l'Oued Boussellem, l'Oued Sahel draine un bassin de 3 750 km². Il est formé par la réunion des Oueds Eddous et Zaiane avec des bassins de drainage de 940 km² et 970 km² respectivement.

La vallée de l'Oued Sahel est relativement étroite et s'étend plus au moins de Bouira à Akbou. L'Oued Boussellem se joint à l'Oued Sahel pour former l'Oued Soummam, à l'embouchure, le bassin versant de l'Oued Boussellem est de 4500 km².

Le cours supérieur de l'Oued Boussellem se trouve sur le plateau de Sétif et pendant la plus grande partie de son cours, une fois le plateau passé, il traverse des régions montagneuses très accidentées en suivant les gorges ou des vallées très étroites.

D'Akbou à Béjaïa, l'Oued Soummam traverse une vallée relativement étroite mais fertile, avant de se jeter dans la mer. L'aire de drainage de la Soummam inférieure (c'est à dire sans compter les bassins versants des Oueds Sahel et Boussellem) est de 1150 km² à son embouchure.

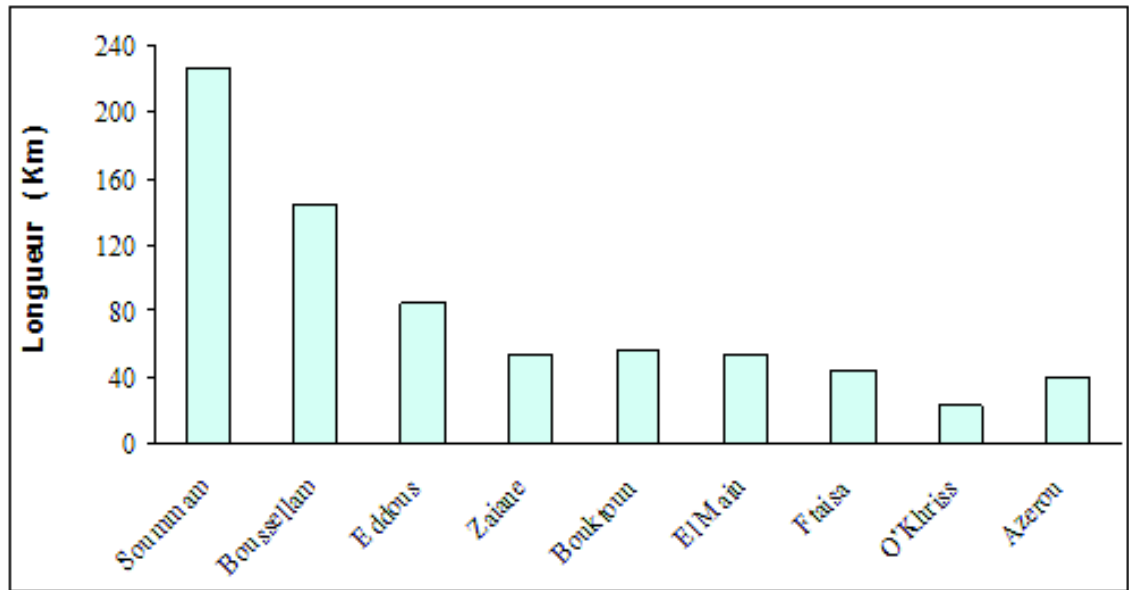


Figure 13 : Longueur des principaux Oueds

Nous pouvons dire que le bassin de la Soummam est composé de trois grands sous bassins suivants :

- sous bassin Eddous–Sahel (région 1)

Il est situé sur la partie Ouest du bassin de la Soummam. Il est formé par la réunion des Oueds Eddous et Zaiane (affluent principal de l'Oued Sahel) ;



Figure 14 : Réseau hydrographique

- sous bassin Soummam (région 2)

Il s'étend sur la partie Nord du bassin, son système principal de drainage comprend l'Oued Soummam qui traverse une vallée relativement étroite mais fertile allant d'Akbou à Béjaïa, avant de se jeter dans la mer ;

- sous bassin Boussellem (région 3)

Il s'étend sur la partie Sud - Est du bassin de la Soummam. Le cours d'eau supérieur de l'Oued Boussellem se trouve sur le plateau de Sétif, dont la plus grande partie de son cours, une fois le plateau passé, traverse des régions montagneuses en suivant des gorges ou des vallées très étroites.

1.3.4 CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES DES SOUS BASSINS

L'étude des caractéristiques du réseau hydrographique permettra de situer le cadre de réception des eaux précipitées et l'organisation du drainage. Les caractéristiques du réseau hydrographique des dix sous bassins de la Soummam sont présentées dans le tableau 4.

Caractéristiques	Eddous	Ziane	Sahel Amont	Azerou	Sahel Aval	Boussellem Amont	Boussellem Moyen	El Main	Boussellem Aval	Soummam
Code	1501	1502	1503	1504	1505	1506	1507	1508	1509	1510
Superficie (km ²)	903	1012	430	1084	326	1785	1234	930	360	1061
Périmètre (km)	205,05	165,89	120,08	169,04	88,57	219,57	244,10	164,82	94,03	183,71
Longueur du Chevelu (km)	635,79	689,02	475,73	671,12	272,84	1092,66	871,82	637,72	192,40	983,37
Indice de Compacité	1,91	1,46	1,65	1,44	1,37	1,46	1,95	1,51	1,39	1,58
Longueur du rectangle équivalent en (km)	293,34	68,07	52,98	68,94	34,80	90,41	111,23	49,44	37,49	78,36
Largeur du Rectangle équivalent en (km)	30,79	14,93	8,25	16,09	9,28	19,83	11,01	32,89	9,65	13,33
Densité de Drainage	0,70	0,69	1,10	0,62	0,85	0,61	0,70	0,68	0,53	0,92
H _{min} (m)	400	400	300	300	200	850	350	350	200	0,00
H _{max} (m)	2150	1500	2100	1850	1850	1750	1700	1700	1400	1650
H _{med} (m)	1275	950	1200	1075	1025	1300	1025	1025	800	8250
Forme du sous bassin	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée	Allongée

Tableau 4 : Caractéristiques géomorphologiques des sous bassins versants de la Soummam

source ANRH (2005)

Les valeurs d'indice de compacité montrent que les sous bassins ont une forme allongée par conséquent un temps de concentration des eaux assez long. La densité de drainage au niveau de chaque sous bassin est dense à l'exception du Boussellem Aval où le chevelu hydrographique est moindre avec une densité de drainage de 0.53.

conclusion

L'étude morphologique de la région nous a permis de déterminer les caractéristiques physiographiques du bassin versant de la Soummam. Celui-ci est de forme allongée favorisant des faibles débits de pointe Les altitudes qui sont comprises entre 2 et 2150 m, sont dans l'ensemble moyennes, ce qui reflète un relief modéré. Ce qui renseigne sur la vitesse des écoulements qui serait moyenne.

Ces caractéristiques physiographiques doivent se compléter par une reconnaissance géologique de la région pour mieux cerner les modalités des écoulements superficiels et souterrains à l'intérieur du bassin.

II - CONTEXTE GEOLOGIQUE

II.3.1 SITUATION DE LA VALLEE DE LA SOUMMAM DANS L'OROGENE ALPIN PERI-MEDITERRANEEN

Les régions littorales de l'Algérie orientale, dont fait partie la vallée de la Soummam, se placent au sein de l'orogène alpin périméditerranéen. Cet orogène en forme d'anneau très aplati, allongé de l'Ouest à l'Est sur 2000 km. Les éléments observables montrent l'opposition de zones, situées à l'intérieur de l'anneau, et de zones situées à sa périphérie (figures 15 et 16) (Kessasra, 2006).

- Les zones internes

Il s'agit des massifs kabyles qui comportent, mais en une seule unité structurale :

- le socle kabyle, antérieur au cycle alpin c'est une puissante série cristallophyllienne : un complexe gneissique souvent injecté de roches granitoïdes, des micaschistes et l'extrême sommet a fourni la célèbre "faune de Stita" (Ordovicien moyen) au Nord de Tizi Ouzou (Barbier, 1948);
- la couverture mésozoïque : le premier terme qui repose sur le socle kabyle est une formation d'âge Oligocène supérieur (Flandrin, 1948, Gélard, Lorenz et Magne, 1973) à Burdigalien inférieur (Bizon et Gélard, 1975) constituée par une brèche basale à éléments de socle jointifs, que surmontent des niveaux argilo-gypseux d'aspect molassique qui se terminent par un olistostrome (Tefiani, 1970, Gélard, Lorenz et Magne, 1973);
- la dorsale kabyle (Durand Delga, 1969) ou chaîne calcaire (Glangeaud, 1932) est une étroite zone, limitant les zones internes, au contact exact des zones externes.

Cet ensemble à dominante schisteuse constitue la couverture normale du cristallophyllien Kabyle. Ce sont des faciès calcaires vermiculés du Trias moyen, des calcaires lités à silex du Lias moyen, de marnes ou marno-calcaires du Crétacé et des calcaires massifs et marnes claires de l'Eocène inférieur-moyen (Flandrin, 1948).



Figure 15 : Carte structurale schématique de la chaîne des Maghrébide montrant la disposition des zones internes et externes d'après Durand-Delga et Fontboté (1980)

- Les flyschs crétacés et paléogènes kabyles

Les flyschs kabyles se présentent de trois manières :

- en situation interne, superposés tectoniquement aux massifs kabyles, flyschs Nord-kabyles ;
- en situation relativement externe, à la bordure Sud de la dorsale, flyschs Sud-kabyles ;
- en situation très externe sous forme de masses isolées flottant sur le Tell.

Trois grandes hypothèses s'affrontent à leur sujet :

- 1 ère hypothèse : les flyschs se seraient déposés au Nord des massifs Kabyles, puis auraient été charriés vers le Sud par-dessus les zones Kabyles. (Mattauer, 1958 in Kessasra, 2006) ;
- 2 ème hypothèse : les flyschs se seraient déposés dans deux bassins, l'un interne et l'autre externe, au Nord et au Sud des amygdales kabyles;
- 3 ème hypothèse : les flyschs se seraient tous déposés dans un sillon externe au Sud des massifs kabyles et auraient été ex traversés vers le Nord et vers le Sud (Durand Delga, 1963). Les flyschs externes ont été subdivisés en flyschs mauritaniens et flyschs massyliens.
- Les zones externes

Les unités telliennes forment un empilement complexe surmontant au Sud l'autochtone "présaharien" des Hautes Plaines.

- Le Tell autochtone ou parautochtone : ses unités sont du Nord au Sud :
 - les écailles pré-kabyles du Nord Constantinois ;
 - la zone sous-kabyle regroupe des formations de l'Ouest de la chaîne numidique (Durand Delga, 1955), l'énorme massif des Babors (Ehrmann, 1924, Leikine, 1972, Hassisène, 1989), les chaînons à l'Ouest de Béjaïa (Duplan, 1952) et les "écailles intermédiaires" au Sud d'Alger (Glangeaud, 1932).
- Les nappes telliennes : elles se regroupent en trois unités que sont du Nord au Sud :
 - les unités ultra-telliennes, on les trouve charriées en paquets isolés sur l'unité de Béni Ourtilène ;
 - les nappes épi-telliennes, comportent du Trias à leur base, le Crétacé supérieur, marneux et l'Eocène sous forme de marnes noires à boules jaunes.;
 - les nappes méso-telliennes ou sud-telliennes (Kieken, 1962), il s'agit d'un empilement complexe d'unités formées de sédiments allant du Sénonien au Miocène, le Trias y est rare, le Crétacé se présente sous forme d'argiles marneuses, l'Eocène de calcaires et de marnes et l'Oligocène est essentiellement marno-gréseux.

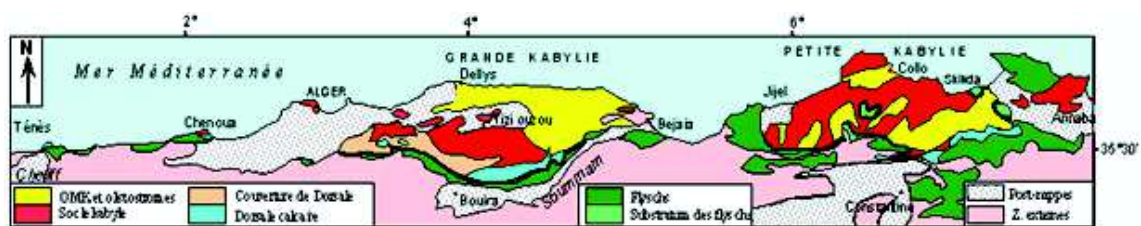


Figure 16 : Schéma géologique de la côte Algérienne à l'Est du cap de Ténès (Wildi, 1983).

II.3.2 CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

La vallée de la Soummam est une plaine de basses terrasses alluviales, allongée sous forme d'une étroite bande sinueuse orientée SW-NE de Tazmalt à Béjaïa. Elle constitue une limite méridionale du Tell algérien.

La vallée est limitée par plusieurs ensembles structuraux comme le montre la figure 17 :

- au Nord, le massif kabyle, la chaîne calcaire et les flyschs nord et sud kabyles ;
- au Sud, le Tell méridional auquel appartiennent les chaînons des Bibans et des Babors.

Ainsi la vallée de la Soummam forme la jonction entre le Tell septentrional au Nord et le Tell méridional au Sud.

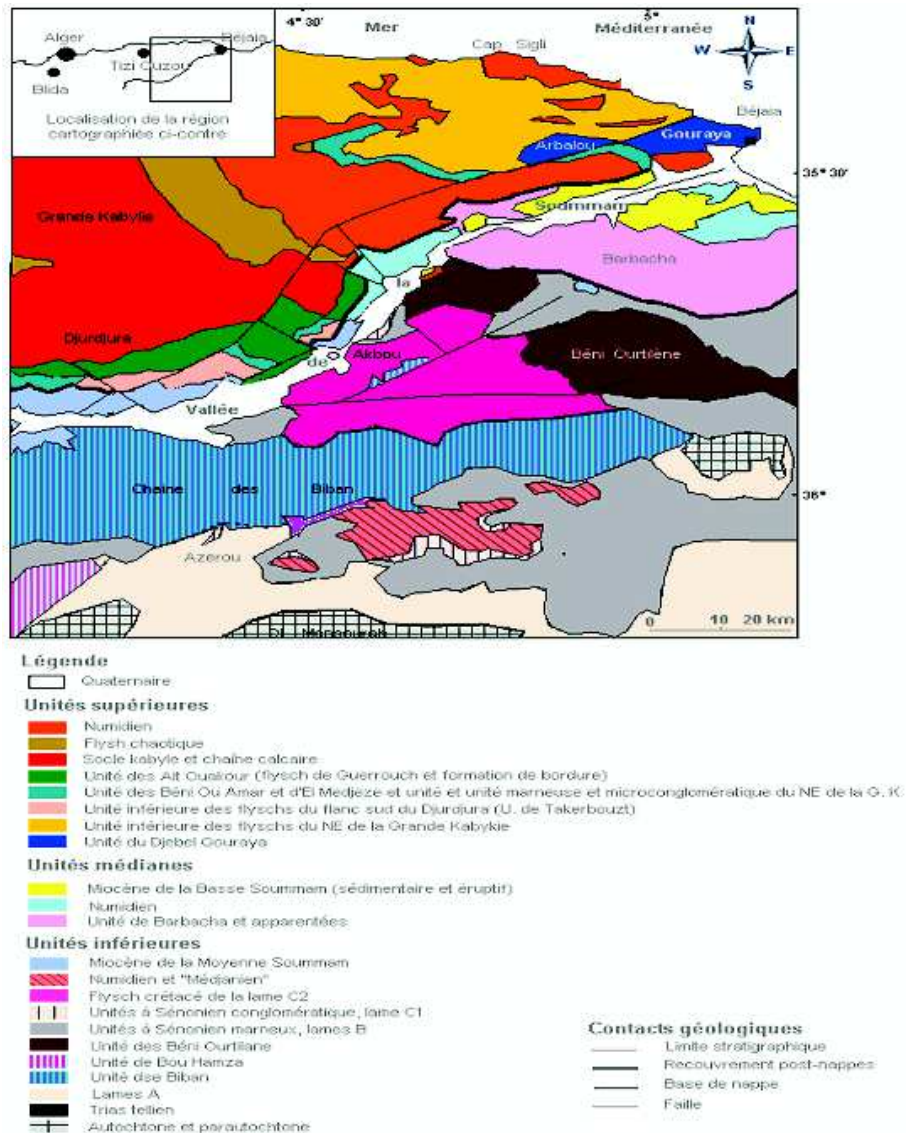


Figure 17 : Schéma structural de l'Est de la Grande Kabylie, des Babors occidentaux et de la région des Bibans, mis à part les contours de la portion centrale et Centro-occidentale du schéma structural qui sont originaux, les autres sont empruntés à A. Caire (1957) pour la portion méridionale, à J. Glaçon (1964) et J-M Vila et M. Leikine (1976) pour la région de Guergour Hellel, à M. Leikine (1971) pour la région située au sud de Béjaïa, à F. Laval (1974) pour le Nord-Est de la Grande Kabylie (D'après A. Coutelle, 1979).

- La lithostratigraphie

La carte géologique réalisée par Meneroud et Rognon en 1970 (figure 18) nous permet de localiser les différents affleurements présents dans la vallée et ses massifs environnants.

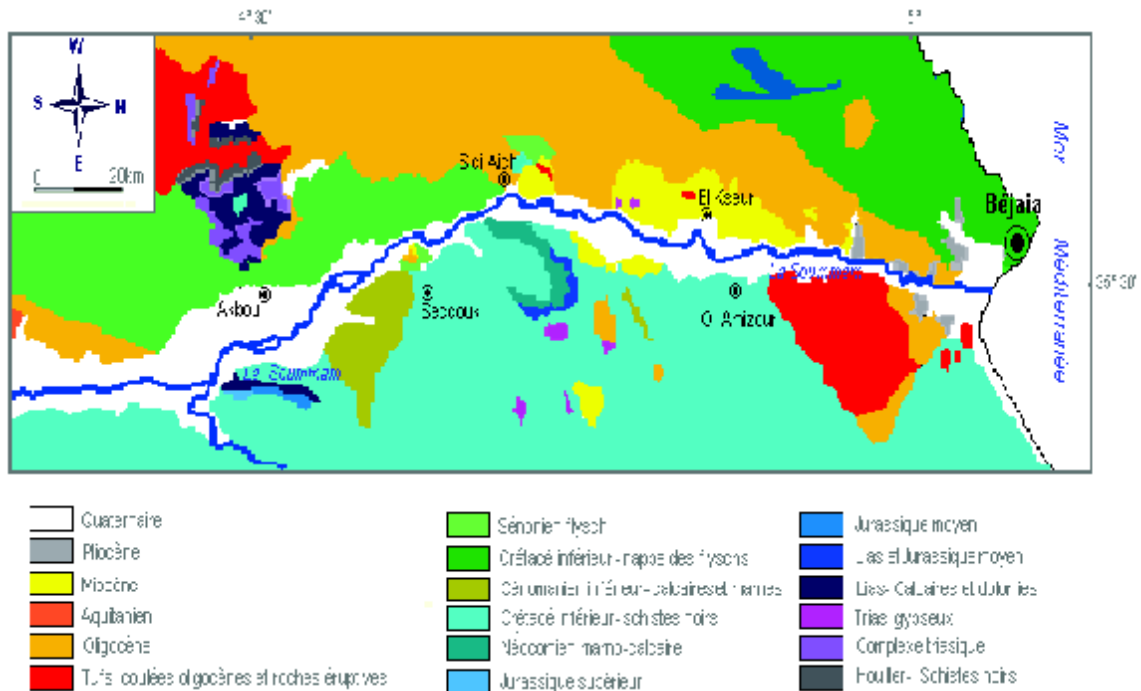


Figure 18 : Carte géologique de la vallée de la Soummam (Meneroud et Rognon, 1970)

La série stratigraphique de ces formations, en partant de la plus ancienne à la plus récente est la suivante :

- Le Trias : caractéristiques géologiques et hydrogéologiques

Il se manifeste sous forme de masses plus ou moins étendues remplissant de grandes cassures (Djebel Gueldamane), on le rencontre également le long des contacts de nappes (Région Nord d'Akbou), mais aussi sous forme d'épointements locaux (Sidi Aïch et Il Maten).

- Le Jurassique : caractéristiques géologiques et hydrogéologiques (Kessasra, 2006).

Il s'agit des écaillés chevauchant au Sud (le chaînon d'Ighil Ali) au Sud-Est (l'écaillé de Sidi Yahia et l'anticlinal faillé de Djebel Gueldamane) et à l'Est (les crêtes de l'Azrou Chtoug qui appartiennent au massif du Djebel Trouna et le croissant de Timezrit). Il affleure également à la limite Nord du bassin, dans les massifs de l'Arbalou, de Toudja et du Gouraya.

L'anticlinal Jurassique de Djebel Arbalou et le synclinal tectonique du Gouraya, dont la lithologie est marquée par la présence de masses calcaires et dolomitiques, sont susceptibles de constituer d'immenses réservoirs aquifères.

A cet égard, la circulation des eaux souterraines est d'une part à porosité de fracture due aux jeux de la grande faille bordière, et d'autre part, fissurale résultant des phénomènes karstiques particulièrement développés, qui sont à l'origine des grandes fissures ouvertes et des centaines de cavités. L'élargissement des joints de calcaires est accéléré par la corrosion.

De ce fait, de nombreuses résurgences apparaissent à la faveur de ces failles. L'apparition des eaux de source dans le bassin n'est pas régulière et dépend de l'intensité

des précipitations, elles sont soumises à de fortes fluctuations au cours de l'année et la plupart tarissent en été.

- Les calcaires liasiques fissurés du flanc Sud-Est de la chaîne du Djurdjura

Le massif de Chellata, massif de l'Akfadou, le pic de Lalla Khadîdja dont la perméabilité est assurée par les nombreuses et larges fissures alimentant plusieurs sources : Tala T'raline, Tala Tiffit, Timiliouine, Anzor Lanak...etc., plus en aval le débit des sources décroît.

- Le Crétacé : caractéristiques géologiques et hydrogéologiques

Le Crétacé parautochtone qui affleure en rive droite depuis l'Oued d'El Mehrir jusqu'au Djebel Gueldamane, également entre l'Oued de Seddouk et Sidi Aïch et en rive gauche à l'Ouest du village d'Ighram.

- Le flysch massylien : caractéristiques géologiques et hydrogéologiques

Il affleure au Sud de l'arête Gouraya-Arbalou et au Nord de la Réunion, il se situe entre le numidien et le Crétacé supérieur tellien. Ce flysch, qui surmonte tectoniquement le flysch mauritanien, est une succession de bas en haut des formations suivantes :

- un flysch albo-aptien représenté par une alternance de grés et d'argiles brunes ;
- une alternance de micro-conglomérats et de niveaux décimétriques de marnes surmontés de bancs bréchiques ;
- un niveau de roches siliceuses noires appelées phtanites, s'intercalant de micro brèches ;
- un flysch marno-calcaire.

II.3.3 LE FLYSCH NUMIDIEN

- Caractéristiques géologiques

La formation numidienne, d'âge plus récent (Oligocène-Miocène inférieur), constitue l'élément géométrique le plus élevé dans tout l'orogène alpin périméditerranéen. Localement, la formation des grés numidiens joue un rôle principal dans la constitution du massif d'Akfadou et de la chaîne littorale

- Caractéristiques hydrogéologiques

Les grés du numidien (massif de l'Akfadou) alimentent de nombreuses sources de faible débit car les marnes interstratifiées empêchent la création de grands réservoirs d'eau.

Les grés du Medjanien renferment des nappes irrégulières qui se déversent par des sources peu abondantes: Béni Méllikeuch, Ait Ouakour.

II.3.4 LE NEOGENE POST-NAPPES

II.3.4.1 Le miocène

- Caractéristiques géologiques

Il est représenté par deux types de roches : les roches sédimentaires et les roches éruptives.

- Roches sédimentaires

- Unité d'Akbou : ce sont des marnes gréseuses et conglomératiques transgressives sur le flysch numidien. Les conglomérats se montrent plus ou moins cimentés par des dépôts de

travertin récents (Ficheur, 1891) et dont les éléments de taille très variable sont empruntés aux flyschs et à la chaîne calcaire (Coutelle, 1971).

- Unité de Takrietz : ce bassin miocène est développé sur la rive gauche de la Soummam entre Sidi Aïch et Oued Ghir. Les premiers lambeaux apparaissent à Takrietz, il s'agit d'un lambeau de grés grossiers et de poudingues rougeâtres avec nombreux fragments d'huître épaisse et de marnes jaunâtres à *Ostrea*. Il forme une dalle faiblement inclinée vers le NW, coupée en deux par le lit de la Soummam, reposant en rive droite sur le Numidien de Takrietz.

- Roches éruptives

Ces roches sont essentiellement de deux types :

- les roches volcaniques proprement dites avec une série inférieure riche en brèches et tufs. Elle est représentée en particulier à Oued Ghir par des rhyolitoïdes associées à des tufs, des pélites et de marnes franches, et une série supérieure avec des laves abondantes. Cet ensemble volcanique est recouvert au Nord-ouest par le Mio-plio-quadernaire de la vallée de la Soummam ;

- les roches plutoniques avec le granodiorite d'Ait Smail en rive droite de la Soummam et le granite monzonitique de Drour. Les argiles de base numidien sont kaolinisées au contact des roches éruptives.

- Les caractéristiques hydrogéologiques

Les granodiorites, les granites et laves miocènes du complexe magmatique Béjaia-Amizour peuvent présenter des possibilités aquifères. Ces roches éruptives possèdent un degré de fracturation très élevé, censé être un facteur favorisant la circulation des eaux d'infiltration. En outre, la position structurale et les dimensions des fractures jouent un rôle déterminant quant à l'exploitation des ressources souterraines. On ignore réellement le potentiel hydraulique de ces formations ainsi que leurs caractéristiques hydrodynamiques.

II.3.4.2 Le pliocène

- Le Pliocène marin

Il n'est connu que dans la vallée de la Soummam, à proximité de Béjaia et en contrebas de l'Oued Ghir, il s'est avancé jusqu'à 15 km vers le Sud à la faveur de la dépression occupée par la Soummam. Ce sont des marnes bleues à *Globorotalia margaritae*, de grés rouges et de gypses (Triasiques) résédimentés (Leikine, 1971).

- Le Pliocène continental

Il s'agit de brèches consolidées à très gros éléments de calcaires jurassiques provenant du démantèlement du Djebel Gouraya, qui reposent sur un terrain du Crétacé supérieur tellien, et de quelques blocs de poudingues infra-crétaciques.

II.3.4.3 Le quaternaire

- Caractéristiques géologiques

Il tapisse le fond de la vallée creusée par l'Oued de la Soummam et ses affluents. Il comprend les importants cônes de déjections des affluents de rive gauche: Oued Béni Mellikeuch, Ighzer Illoula, Ighzer Tifrit et ceux de la rive droite : Oued Seddouk et Ighzer Oukri.

- **Caractéristiques hydrogéologiques**

La couverture alluviale de la vallée de la Soummam paraît largement épaisse. Déposée sous forme de terrasses Mio-plio-quaternaires superposées l'une sur l'autre, elle constitue, de par sa lithologie formée essentiellement d'alluvions grossières: sables, galets, graviers du Miocène, sus-jacentes à un substratum marneux miocène, argileux oligocène et même parfois crétacé plus ou moins profond, et de par sa porosité d'interstice un réservoir considérable.

D'ailleurs, l'approvisionnement en eau potable, industrielle et d'irrigation est en partie basée sur l'exploitation de cet aquifère à travers les nombreux ouvrages hydrauliques qui y ont été implantés : forages d'exploitation, puits, sondages de reconnaissance.

II.3.4.4 La tectonique

A. Coutelle en 1979 avait résumé chronologiquement le déroulement des différentes phases tectoniques précoces dans la vallée de la Soummam comme suit :

- **Phase néocomienne**

C'est une phase de plissements assez complexes orientés NE-SW, parallèle à l'actuelle direction des couches de l'Adrar Gueldamane, avec fracturations locales. Le Néocomien est partout conglomératique, tantôt concordant avec le Jurassique, tantôt discordant et affecté de failles synsédimentaires (Azrou Toudert) ;

- **Phase sénonienne** (Ficheur, 1890)

Dans la mesure où les plis à schistosité de l'unité de Bou Hamza ont la même direction que les plis à cœur Vracono-cénomaniens du Djebel Edni. Ces phénomènes sont alors postérieurs à ces niveaux, par comparaison avec l'unité des Béni Ourtilène, anté-sénonien ;

- **Phase éocène**

La sédimentation des unités externes de la vallée de la Soummam est interrompue dès le Lutétien supérieur jusqu'au Miocène anté-nappes. La structuration des unités des Bibans, de Bou Hamza et des Béni Ourtilène est antérieure à l'arrivée des nappes qui les recouvrent ;

- **Phase miocène**

Elle est reconnue comme une phase très importante dans la région. Au Langhien a eu lieu la phase paroxysmique responsable des charriages des nappes. Cette phase a été précédée par une autre période de tectonisation (Bizon et Gélard, 1975) où les flyschs ont glissé par dessus le domaine kabyle. La série de la Djema N'schribt, qui a été mise en évidence à Sidi Aich, est discordante sur le Sénonien de l'unité de Barbacha. Elle est immédiatement surmontée par le Miocène post-nappe de la Soummam.

- **Tectonique post-nappes**

Elle est importante, l'individualisation des trois super-unités de la région d'Akbou est postérieure au dépôt du Miocène de la Soummam. Le contact faillé séparant le Miocène continental des flyschs étant post-nappe.

- **Tectonique récente**

A l'Est d'Akbou et à l'Ouest de Takrietz, elle est représentée par une fracturation assez importante. De nombreuses failles orientées NE-SW sont visibles telles que la faille de Tachaouaft au SE, la faille de Tibouamouchines et la faille de la Soummam, qui a été

reconnue par Boudiaf (1999) comme étant active de la région de Tazmalt. Cette famille de failles est parfois décalée par une autre famille de fracturation d'orientation moyenne WNW-ESE, qui paraît plus ancienne que la précédente avec laquelle semble constituer un réseau ordonné.

II.3.5 UNITE ET FORMATIONS AQUIFERES

L'exploitation des rapports hydrogéologiques effectués dans le bassin de la Soummam a permis d'y identifier trois principales unités hydrogéologiques (figures 19 et 20).

- unité de Sétif

Occupant le sous bassin versant de l'Oued Boussellem, cette unité s'étend sur la région de Sétif. Elle couvre une superficie d'environ 856 Km² ;

- unité de la vallée de la Soummam

C'est un vaste couloir à fond plat, bordée de part et d'autre par des chaînes de montagnes. Elle comprend l'unité de la basse Soummam et l'unité de la haute et moyenne Soummam qui s'étend sur une superficie de 368 km² ;

- unité du plateau d'El Asnam

Le plateau dessine un petit plateau étiré, d'une longueur de 11 km et d'une largeur de 5 km. Le plateau d'El Asnam est constitué par des formations Mio-quadernaires rougeâtres faiblement attaquées par l'érosion ; son altitude moyenne est de 700 m à l'Ouest, il s'abaisse progressivement vers l'Est, aux environs de 550 m. Les oueds sont par endroits, profondément encaissés.

- Caractéristiques hydrodynamiques

Les caractéristiques hydrodynamiques des différentes unités hydrogéologiques du bassin sont présentées dans le tableau 5 (Belgaïd, 1997).

Les terrasses alluviales des oueds qui sont en général, des sables et des graviers de bonne perméabilité sont plus développées dans la vallée de la Soummam depuis Tilesdit (surtout en aval d'Akbou), elles constituent avec les nappes du plateau de Sétif la principale ressource en eau souterraine de toute la région. Elles recèlent également de petites nappes dans les plaines côtières qui s'étendent entre Bejaïa et l'Oued Agroun où elles sont associées à des dunes de sable anciennes ou récentes.

A l'exception des calcaires du Djurdjura, diverses formations aquifères considérées sont de l'ordre de quelques dizaines de mètres, en général 10 à 25m (les alluvions de l'Oued Soummam, au maximum 50m dans les calcaires éocènes et les calcaires lacustres de Sétif).

La perméabilité est généralement bonne de l'ordre de $1 \text{ à } 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$, à l'exception pour la nappe pliocène de la basse Soummam ($K=1 \cdot 10^{-5} \text{ à } 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) et les débits sont dans l'ensemble satisfaisants

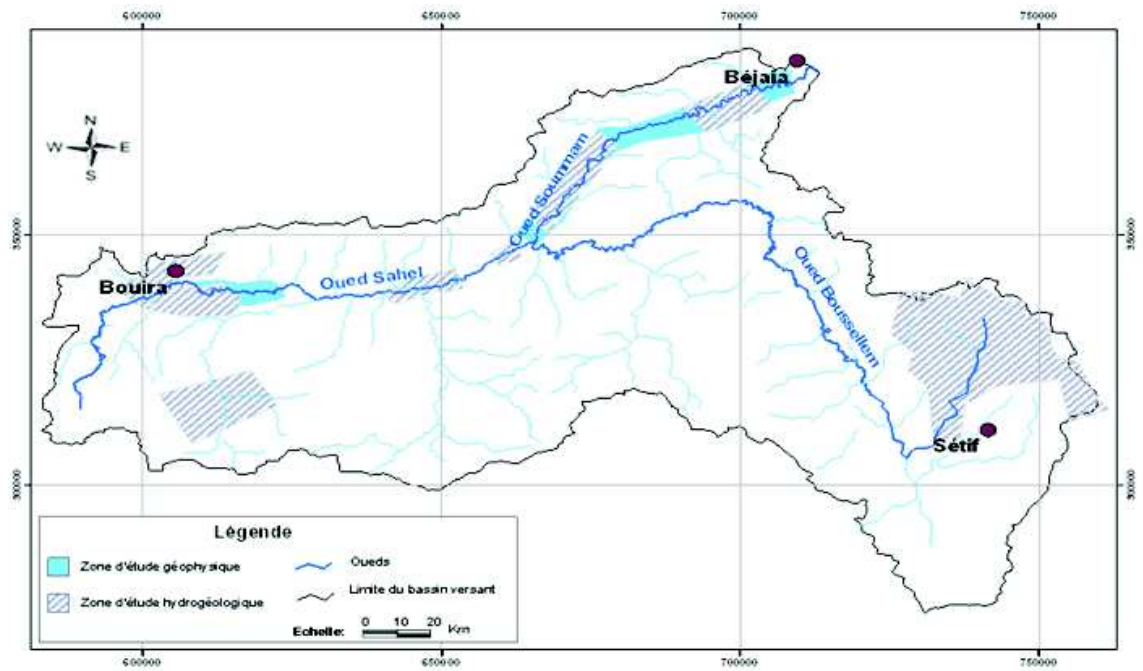


Figure 19 : Zones d'études géophysiques et hydrogéologiques

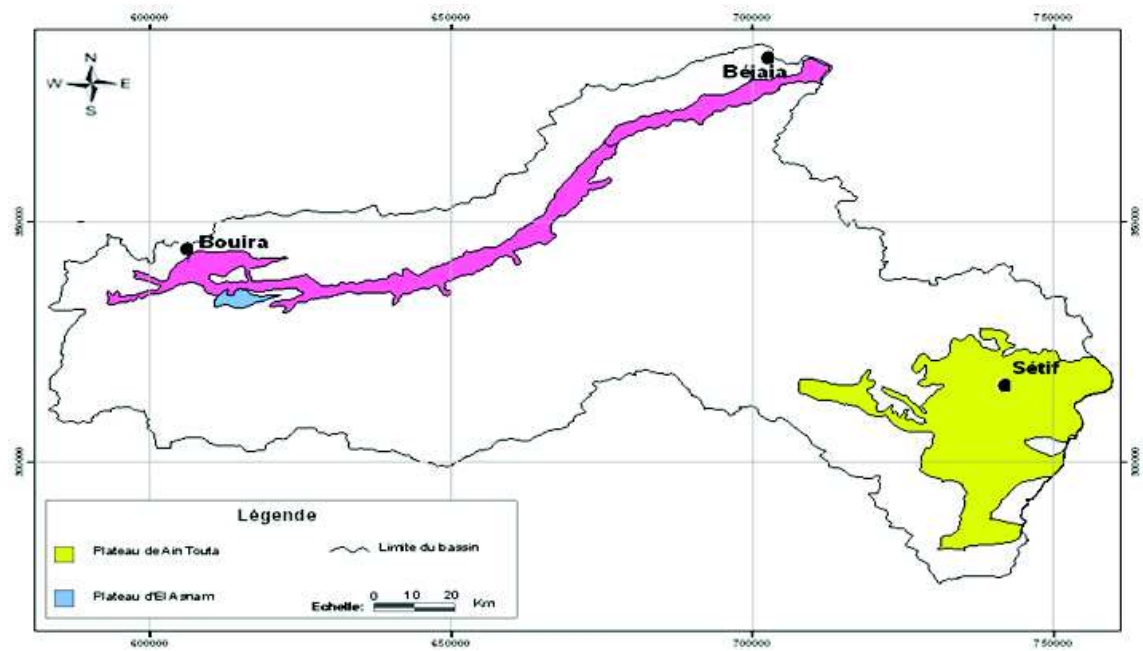


Figure 20 : Répartition des unités hydrogéologiques dans le bassin de la Soummam

UNITES HYDROGEOLOGIQUES	AQUIFERES	EXTENSION	PUISSANCE DES NAPPE S	PROFONDEUR DE LA SURFACE PNEUMATIQUE	CAPACITE DES OUVRAGES	POTENTIALITE DES NAPPE S	POTENTIALITE TOTALE
Sétif	N1 : la nappe quaternaire (sables, graviers et argiles $K=1.10^{-4}$ m/s)	S.SW de Sétif	5 à 15 m	1 à 8, m	$Q=0,3$ à 1 l/s	30 Mm ³ /an	33,3 m ³ /an
	N2 : la nappe du Pliocène (calcaire lacustre, limons et conglomérats $K=5.10^{-2}$ m/s)	Nord de Sétif	10 à 35m	0 à 5m	$Q = 57$ l/s		
	N3 : la nappe de l'Eocène inférieur (calcaire, silice et marnes $T=3$ à 8.10^{-4} m ² /s)	GALEA	20 à 50m	1 à 20, m parfois artésienne	$Q=30$ à 50l/s		
	N4 : la nappe du Maestrichtien et Campanien (calcaires)		30 à 45m	20, m	10 à 20l/s (Maestrichtien)		
	N5 : la nappe du Crétacé inférieur (calcaires et dolomies)		50 à 100m	20, m	30 à 80 l/s (Sénonien) 20 à 200 l/s		
Basse Soummam	N1 : la nappe alluviale (sables, graviers et limons $K=1.10^{-2}$ à 5.10^{-4} m/s.	Vallée O. Soummam	10 à 25m	1 à 30, m	5 à 80 l/s	85 Mm ³ /an	Dynamique : 6 à 8 l/s Régulatrices:10.5 Mm ³ /an (Energoprojet 1990) Statiques : 114 Mm ³ /an
	N2 : la nappe du Pliocène (graviers et sables avec argiles $K=1.10^{-2}$ à 5.10^{-2} m/s)	Tala Hamza, vers El Kseur	15 à 20m		50 à 70 l/s		
Haute Soummam	N1 : la nappe alluviale (sables, graviers, limons et argiles)	O. Soummam, Sahel, Hamza, Bled El Madjen	5 à 30m	2 à 9, m (O Sahel) et de 1 à 3, m (Bouira)	2 à 25 l/s	125 Mm ³ /an	250 Mm ³ /an 428 Mm ³ /an = 240 (Energoprojet 1990)
	N2 : la nappe du Miocène (poudingues)	El Asnam, Hamza, Moy Soummam, Bled El Madjen	20 à 92m	2 à 48, m (Bouira) 1 à 10, m Hamza	9 à 12 l/s (Bouira), 10 à 22 (Al Asnam)		
	N3 : la nappe jurassique (karst)	Djurdjura	0 à 10m	1 à 10 Hamza			

Tableau 5 : Caractéristiques hydrodynamiques des différentes unités hydrogéologiques du bassin

III - RESSOURCES EN EAUX DANS LE BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAM

Nous représentons dans ce chapitre, les ressources en eaux qualitatives et quantitatives dans le bassin versant de la Soummam.

III.3.1 Evaluation des potentialités en eau

Evaluation des potentialités en eau superficielle

Les potentialités en eau de surface du bassin de la Soummam sont estimées à 684Hm³/an, soit 16 % des potentialités en eau du bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soummam dont le bassin de la Soummam fait partie (PNE, 2003).

Les potentialités en eau superficielle sont illustrées dans le tableau 6.

Tableau 6 : Potentialités en eau superficielle

Sous bassin versant	Code	Superficie du S.B.V (Km ²)	Apport annuel (Hm ³)
Boussellem	150401	4.309	165,4
Eddous – Sahel	150302	3.755	167,0
Soummam	151001	1.061	132,7
Total		9.125	465,1*

Source PNE (2004)

* Apport moyen interannuel mesuré à la station de Sidi Aïch situé à 40 km de l'embouchure de l'Oued Soummam.

· ***Evaluation des potentialités en eau souterraine***

Les unités hydrogéologiques du bassin se répartissent comme suit :

- nappe de la haute et moyenne Soummam ;
- nappe de la basse Soummam ;
- nappe d'El Asnam ;
- nappe des hautes plaines Sétifiennes.

L'estimation de la ressource en eau souterraine dans le bassin de la Soummam faite sur la base des résultats du Plan National de l'Eau (PNE), est donnée dans le tableau 7.

Tableau 7 : Potentialités en eau par unité hydrogéologique

Unité hydrogéologique	Nature des réservoirs	Potentialités (Hm ³ /an)
Soummam	Alluvions de Oued Soummam et Miocène	100
Cap Aokas	Alluvions et sables dunaires	3
Plateau d'El Asnam (Bouira)	Graviers et argiles quaternaires et Miocène	15
Plaines côtières de Béjaïa	Quaternaire	35
Total		153

Source PNE (2004)

Les potentialités en eau de l'unité hydrogéologique de la Soummam sont de 100 Hm³/an, soit 65% de la ressource en eau souterraine dans le bassin versant de la Soummam.

- Le bilan de la nappe

Le bilan d'une nappe est l'équilibre naturel d'un aquifère entre le débit moyen des apports et le débit moyen des sorties. En y ajoutant l'exploitation humaine qui englobe les prélèvements sous forme de puits et de forages et les apports artificiels (Detay, 1997).

- de Sidi Aïch à Béjaïa

Le bilan de la nappe des alluvions de la basse vallée de la Soummam établi par Clinckx, (1973) pour la période juin 1971 à septembre 1971, a été défini par l'équation suivante :

$$V_0SA + (V_v + VN) = V_0B + VNB + V_0P + VNP$$

Avec :

V_0SA : Volume transitant à Sidi Aïch ;

$V_v + VN$: Volume d'eau correspondant à la vidange de la nappe et des versants ;

V_0B : Volume d'eau écoulé par la Soummam à l'embouchure ;

VNB : Volume d'eau de la nappe qui fuit vers la mer ;

V_0P : Volume prélevé directement dans la rivière ;

VNP : Volume prélevé directement dans la nappe.

Les différents termes du bilan pour cette période sont consignés dans le tableau 8.

Termes du bilan	Entrées (m ³)	Sorties (m ³)
V_0SA	26.773.632	
$V_v + VN$	2.170.000	
V_0B		23.505.984
VNB		1.907.884
V_0P		1.264.895
VNP		2.582.496
Bilan total des flux	28.943.632	29.261.260

Tableau 8 : Bilan des entrées-sorties dans l'aquifère de la basse vallée de la Soummam juin- septembre 1971

- de Tazmalt à Sidi Aïch

Le bilan annuel de la nappe des alluvions de la moyenne vallée de la Soummam établie par Bennabi en 1983 (in Kessasra, 2006) se présente comme suit :

- les apports

- apports de l'Oued Sahel à Tazmalt est de l'ordre de $203.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
- apports par Oued Boussem et les affluents à Akbou est de $259.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
- apport souterrain de la nappe à Cheurfa est estimé à $28.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Donc on obtient un total des apports de la nappe des alluvions de l'ordre de $491.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

- les sorties ou pertes

- le volume d'eau qui transite à Sidi Aïch est évalué à $559.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;

- le volume prélevé par pompage dans la nappe est équivalent à $4.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$;
 - le volume prélevé dans l'oued s'élève donc à $0.17 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
- Ce qui fait un total équivalent à $564.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

III.3.2 MOBILISATION DE LA RESSOURCE EN EAU

III.3.2.1 Mobilisation des eaux superficielles

Barrages

Le bassin de la Soummam compte actuellement 02 barrages en exploitation à savoir : Lekhal et Ain Zada, totalisant une capacité de 155 Hm^3 (AHS, avril 2003) et régularisant un volume de 67 Hm^3 par an.

Par ailleurs, nous notons l'existence de deux autres barrages récemment en exploitation; Tichy Haf et Tilesdit totalisant une capacité de 247 Hm^3 .

Les principales caractéristiques de ces barrages existants (PNE 2003) sont illustrées dans les tableaux 9 et 10.

Nom du Barrage	Apport moy (Hm ³ /an)	Envasement Annuel (Hm ³ /an)	Volume mort (Hm ³ /an)	Volume utile (Hm ³)	Volume Régularisé (Hm ³ /an)	Type de Barrage
Lekhal	22	0,17	5,00	25,00	17	Terre
Ain zada	90	0,50	15,00	110,00	50	Terre
Tichy Haf	-	-	-	-	150	Voûte
Tilesdit	-	-	-	-	73	Terre Zoné

Tableau 9 : Caractéristiques des barrages du bassin de la Soummam

Source PNE (2004)

Nom du Barrage	Destination		Volume Affecté (Hm ³ /an)	
	Localités desservies	Périmètres Irrigués	AEP-AEI	IRRIG
Lekhal	Ain Bessam, S.El Ghozlane et El Hachimia	Arib	06	11
Ain Zada	Sétif, B.B.Arréridj et El Eulma	-	50	-
Tichy Haf	* AEP et AEI du couloir Akbou - Béjaïa	* Sahel et la basse Soummam (43m ³ /an)		
Tilesdit	AEP et AEI de la ville de Bouira et des communes limitrophes (23 Hm ³ /an)	* Irrigation du plateau d'El Asnam (2200ha) * Irrigation de la vallée du Sahel (3400 ha)		

Tableau 10 : Différentes utilisations des barrages du bassin de la Soummam

Source PNE (2004)

Barrage Lekhal

Il est situé à 5 km d'Ain Bessem dans la wilaya de Bouira. Il est implanté à la confluence des Oueds Lekhal et Fahem. Les apports de l'Oued Lekhal sont estimés à 22 Hm³/an pour une superficie du bassin versant de 189 km². Il est destiné à l'irrigation des périmètres des A ribs et à l'alimentation en eau d'Ain Bessem, Sour El Ghozlane et la Zone industrielle.

· Barrage Tilesdit

Ce barrage est situé à 18 km environ à l'Est de la ville de Bouira. D'une capacité de 167 Hm³ et un volume régularisé de 73 Hm³/an. Le barrage Tilesdit est destiné au renforcement de l'approvisionnement en eau potable de la ville de Bouira et de ses communes limitrophes, de la zone industrielle de Sidi Khaled ainsi qu'à l'irrigation des périmètres projetés : plateaux 'El E snam et vallée du Sahel' et 'Bled El Madjen, Hamza et El Hachimia'.

· Retenues collinaires

A travers le territoire du bassin de la Soummam, 73 retenues collinaires ont été recensées (tableau 11) selon la DMRE du Ministère des Ressources en Eau (MRE, 2000 in PNE, 2004).

Tableau 11 : Retenues collinaires et leurs capacités par wilaya

Wilaya	Retenues collinaires	
	Nombre	Capacité×1000 m ³
Béjaïa	29	1,15
Bouira	33	4,62
Sétif	9	5,83
Bordj Bou Arréridj (BBA)	2	0,80
Total	73	12,4

Source: ANB (2003)

La capacité totale de ces retenues est de 12,4 Hm³, dont 47% et 37 % respectivement dans les wilayas de Sétif et Bouira (33 retenues collinaires).

III.3.2.2 Mobilisation des eaux souterraines

La mobilisation de la ressource en eau souterraine se fait par forages, puits et sources qui captent les principales nappes du bassin.

Selon la direction de l'hydraulique des wilayas (DHW): Béjaïa, Sétif, Bordj Bou Arreridj (BBA) et Bouira, le bassin versant de la Soummam compte 310 forages (tableau 12 et figure 21) dont 259 sont en exploitation. Le volume exploité est de 179.30 Hm³/an répartis comme suit :

- 170 forages affectés à l'alimentation en eau potable, exploitant 88,30 Hm³/an ;
- 69 forages alloués à l'irrigation exploitant 75 Hm³/an ;
- 20 forages utilisés pour l'industrie, exploitant 16 Hm³/an ;
- 24 sont à l'arrêt, dont 12 abandonné et 27 non équipé.

Tableau 12 : Récapitulation par wilaya des volumes d'eau exploités par forages

ETUDE DES RESSOURCES EN EAUDU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAMPAR L'UTILISATION DU SIG

Wilaya	Nombre de forages	Volume produit (Hm ³ /an)	Affectation (Hm ³ /an)		
			Eau potable	Irrigation	Industrie
Bouira	207	145,00	25,00	5,00	0 14 0 2
Béjaïa	207	145,00	25,00	5,00	0 14 0 2
Sétif	17	7,00	0	0	0 0 0 0
Total	310	179,30	88,30	75	16

Source DHW (2000)

La wilaya de Béjaïa compte un nombre important de forages (207), produisant un volume de 145 Hm³/an, soit 81% du volume total exploité.

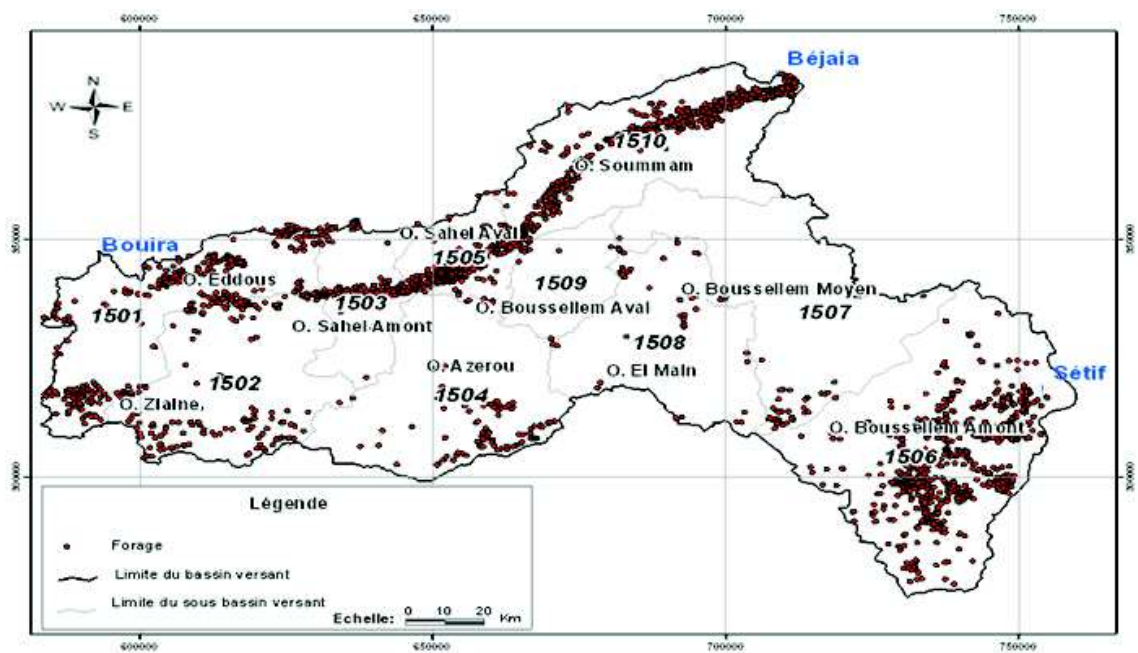


Figure 21 : Localisation des forages

III.3.3 evaluation des besoins en eau

La wilaya de Bouira dispose d'importantes surfaces aptes à l'agriculture et demeure caractérisée par sa vocation agricole.

La superficie agricole utile représente 429 630 ha, soit 47 % de la superficie totale du bassin. La répartition des Superficies Agricoles Utiles (SAU) par wilaya, selon le Recensement Générale de l'Agriculture (RGA), est représentée dans le tableau 13.

Tableau 13 : Répartition de la superficie agricole utile (SAU) par wilaya

Wilaya	Superficie (ha)
Béjaïa	53 327
Bouira	108 207
Sétif	159 513
BBA	108 583
Total	429 630

Source: ONS

· Demande en eau des grands périmètres d'irrigation (GPI)

Le bassin de la Soummam compte actuellement deux grands périmètres d'irrigation (GPI) en exploitation à savoir: les Aribis et M'Chedellah (figure 22).

· Périmètre des Aribis

Créé en 1988, ce périmètre avait à l'origine une superficie de 2 200 ha. L'alimentation en eau du périmètre est assurée à partir du barrage Lekhal dont le volume régularisé est de 17 Hm³. Le volume destiné à l'agriculture représente 11 Hm³. Ce volume varie chaque année en fonction de l'état de la mobilisation de ce barrage. Cette situation a une répercussion directe sur la variation des surfaces irriguées pour chaque campagne d'irrigation.

· Périmètre de M'Chedellah

Créé en 1985, ce périmètre est compris entre l'Oued El Bared, l'Oued Ouakour et Oued Sahel. Il présente une superficie équipée de 1 600 ha. Le périmètre de M'Chedellah est alimenté à partir des forages aux nombres de 21 et de la dérivation de l'Oued El Bared.

· Besoins en eau

D'après l'étude du Plan National de l'Eau (PNE), les besoins en eau des deux périmètres d'irrigation sont donnés dans le tableau 14.

Périmètre	Superficie irriguée (ha)	Demande en eau (Hm ³ /an)
Aribis	2.200	1,2
M'Chedellah	1.600	1,2
Total	3.800	2,4

Tableau 14 :Demande en eau des Grands périmètres d'irrigation (GPI)

Source PNE (2004)

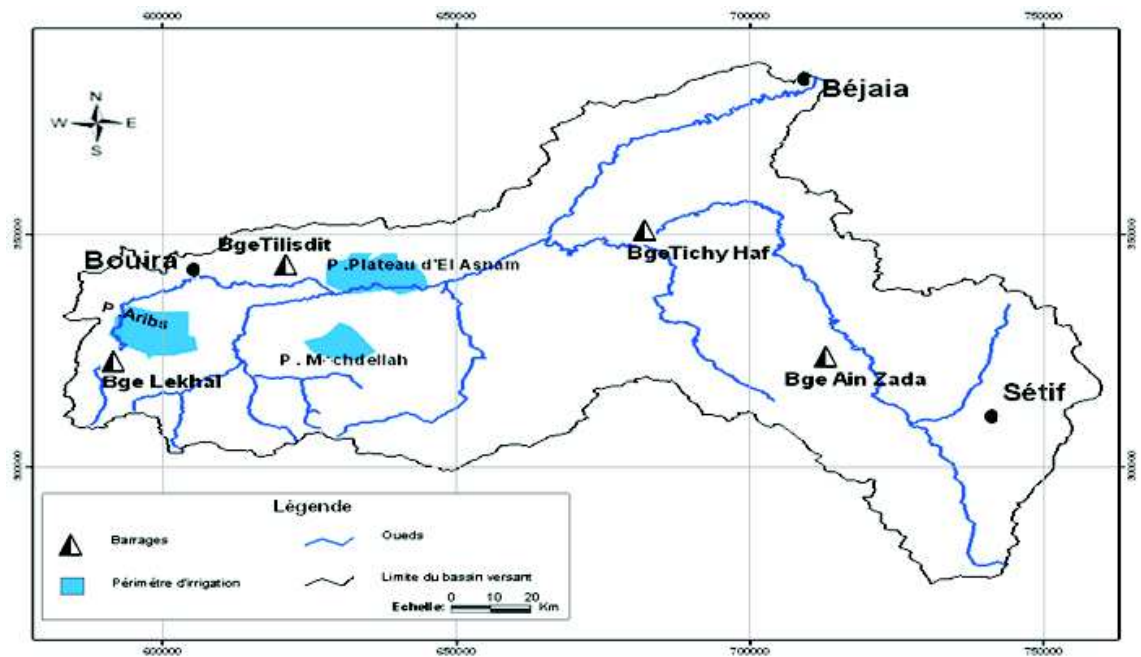


Figure 22 : Localisation des périmètres d'irrigation

La demande estimée en eau de la petite et moyenne hydraulique (PMH) à partir des données de la DSA est mentionnée dans le tableau 15.

Tableau 15 : Besoins en eau de la PMH par commune

Wilaya	Superficie irriguée (ha)	Besoin en eau (Hm ³ /an)
Béjaïa	5 636	28,18
Bouira	4 609	23,05
Sétif	6 837	34,18
BBA	1 395	6,92
Total	18 466	92,33

Source : ABH-AHS (2004)

D'après le tableau 15, la demande en eau actuelle de la PMH est estimée à 92 Hm³/an pour une superficie irriguée de 18 466. Au niveau de BBA les besoins en eau ne sont que de 6,92 Hm³/an.

III.3.4 Qualité des eaux superficielles

- Présentation du réseau de surveillance de la qualité des eaux superficielles
 - Description du réseau

Le suivi de l'évolution de la qualité des eaux superficielles est assuré à travers un réseau national de surveillance de la qualité des eaux mis en place par ANRH en 1984.

Ce réseau est composé de stations d'échantillonnage situées le long des principaux oueds et au niveau des barrages. Les critères de choix de ce réseau sont les suivants :

- barrages destinés à l'alimentation en eau potable ;

- accessibilité aux oueds, pour la prise des échantillons ;
- proximité des stations hydrométriques, afin de disposer de données sur les débits ;
- points de rejets.

· Stations de surveillance de la qualité des eaux superficielles

La qualité de l'eau des principaux oueds et barrages du bassin de la Soummam est mensuellement suivie au moyen d'un réseau de surveillance de la qualité. Ce réseau est constitué de six stations (tableau 16) dont les mesures sont échantillonnées tous les ans avec une fréquence d'une (01) campagne par mois.

Tableau 16 : Stations de surveillance de la qualité des eaux superficielles dans le bassin de la Soummam

Bassin	Code	Nom de la station	Oued
Soummam	151001	Sidi Aïch	Soummam
Eddous-Sahel	150106	Barrage de Tilesdit	Eddous
	150505	Allaghane	Eddous
	150301	M'Chedellah	Eddous
	150114	Barrage de Lekhal	Lekhal
Boussellem	150723	Barrage d'Ain Zada	Boussellem

ANRH (1984)

· Altérations et paramètres

Les altérations sont des groupes de paramètres de même nature ou de même effet permettant de décrire les types de dégradations de la qualité de l'eau. Le tableau 17 présente les principaux paramètres retenus pour chacune des altérations.

Tableau 17 : Paramètres retenus pour chaque altération

Altérations	Paramètres
Matières organiques et oxydables	O ₂ dissous, DCO, DBO5 et MO.
Matières azotées	NH ₄ ⁺ , NO ₂
Nitrates	NO ₃ ⁻
Matières phosphorées	PO ₄ ³⁻
Paramètres physico-chimiques	pH et RS

· Grille de classification de la qualité

L'évaluation de la qualité des eaux superficielles est appréciée à partir d'une grille qui associe pour une série de paramètres des valeurs seuils. Nous distinguons quatre classes de qualité : bonne, moyenne, mauvaise et très mauvaise, représentées respectivement par des couleurs bleu, vert, jaune et rouge (tableau 18).


Dix (10) paramètres sont utilisés pour définir la qualité. Elle est définie par comparaison des résultats d'analyses, pour chaque paramètre, aux valeurs limites spécifiques à chaque classe de qualité.


Tableau 18 : Grille de qualité


ETUDE DES RESSOURCES EN EAUDU BASSIN VERSANT DE LA SOUMMAMPAR L'UTILISATION DU SIG


Désignation	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très Mauvaise
pH (*)	6.5-8.5	6.5-8.5	8.5-9	>9 et <6.5
O2 Dissous %	100-90	90-50	50-30	<30
NH ₄ ⁺ mg/l	0-0.01	0.01-0.1	0.1-3	>3
NO ₂ mg/l	0-0.01	0.01-0.1	0.1-3	>3
NO ₃ mg/l	0-10	10-20	20-40	>40
PO ₄ ³⁻ mg/l	0-0.01	0.01-0.1	0.1-3	>3
DBO ₅ mg/l	<5	5-10	10-15	>15
DCO mg/l	<20	20-40	40-50	>50
MO mg/l	<5	5-10	10-15	>15
RS mg/l	300-1000	1000-1200	1200-1600	>1600

Source :ANRH (2005)

 Eau de bonne qualité, utilisée sans exigence particulière ;

 Eau de qualité moyenne, utilisée après un simple traitement ;

 Eau de mauvaise qualité, ne peut être utilisée qu'après un traitement très poussé ;

 Pollution excessive, ne peut être utilisée qu'après traitements spécifiques.

- Méthodologie de calcul de la qualité par station

La méthode appliquée utilise une approche par prélèvement, c'est à dire que l'on qualifie chaque prélèvement mensuel puis la qualité annuelle est déterminée en appliquant la règle dite des "90 %" en retenant :

- la valeur la plus élevée lorsque l'on dispose de moins de 10 prélèvements dans l'année ;

- l'avant dernière valeur, dans l'ordre croissant, lorsque l'on dispose de plus de 10 prélèvements dans l'année.

La classe de qualité globale retenue est celle du paramètre le plus déclassant.

- Qualité des eaux de barrages

Nous allons dans un premier temps faire le constat des résultats de mesures de la qualité obtenus en 2003 des deux barrages du bassin de la Soummam à savoir Lekhal et Ain Zada destinés à l'alimentation en eau potable. Pour cela nous déterminons la qualité suivant la méthodologie décrite ci-dessus, puis nous comparons les résultats de cette campagne avec ceux de la période allant de 1998 à 2003.


- Qualité des eaux du barrage Lekhal
- Evolution mensuelle de la qualité des eaux (année 2003)

Une station de surveillance de la qualité (code 150114) est implantée sur Oued Lekhal pour le suivi de la qualité des eaux du barrage. Le tableau 19, présente les résultats d'analyses.

Paramètres	Matières organiques et oxydables				Matières azotées		Nitrate	Matière phosphorée	Paramètres physico-chimiques	
	O ₂ D	DCO	DBO ₅	MO	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	pH	RS
Janvier	Vert	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune	Jaune	Vert	Bleu		
Février	Vert	Jaune	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Jaune	Bleu		
Mars	Bleu	Rouge	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune	Jaune	Bleu		
Avril	Rouge	Jaune	Bleu	Bleu	Jaune	Jaune	Jaune	Bleu		
Mai	Bleu	Jaune	Bleu	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Bleu		
Juin	Vert	Bleu	Bleu	Bleu	Jaune	Jaune	Jaune	Bleu		
Juillet	Rouge	Bleu	Bleu	Vert	Bleu	Jaune	Vert	Bleu		
Août	Bleu	Rouge	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Jaune	Bleu		
Septembre	Vert	Vert	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Vert	Bleu		
Octobre	Vert	Rouge	Bleu	Vert	Jaune	Vert	Vert	Bleu		
Novembre	Vert	Rouge	Bleu	Vert	Vert	Vert	Vert	Bleu		
Décembre	Vert	Jaune	Bleu	Vert	Bleu	Vert	Vert	Bleu		

Tableau 19 : Qualité mensuelle des eaux du barrage Lekhal pour l'année 2003

Source : ANRH (2005)

Remarque :  Sursaturation en oxygène

Les eaux du barrage Lekhal présentent une bonne minéralisation durant tous les mois de l'année (résidu sec inférieur à 1 g/l). La teneur en matières organiques (MO) est bonne (MO < 5 mg/l) pour les mois de janvier, mars, avril, mai et juin. Elle est moyenne pour les autres mois de l'année (février, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre.). Une sursaturation en oxygène est enregistrée au mois de juin, Ce phénomène est dû à la prolifération accrue en algues.

La concentration en oxygène est plutôt bonne et moyenne durant toute l'année 2003. Cependant l'exception est faite pour les mois d'avril et juillet où le déficit est dû aux apports en matières organiques ou à un début de mélange des eaux du fond et de surface, ce qui est appelé communément phénomène de brassage saisonnier.

Les eaux du barrage de Lekhal présentent une excellente concentration en DBO₅ (<5 mg/l). Elle se trouve dans la classe I (bonne qualité) pendant toute l'année 2003.

Evolution annuelle de la qualité des eaux (1998-2003)

L'évolution annuelle de la qualité des eaux du barrage Lekhal entre la période 1998 et 2003 est représentée dans le tableau 20.

Paramètres	Matières organiques et oxydables				Matières azotées		Nitrate	Matière phosphorée	Paramètres physico-chimiques	
	O ₂ D	DCO	DBO ₅	MO	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	PH	RS
1998	Rouge	Vert	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Bleu	Bleu		
1999	Vert	Jaune	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Bleu	Bleu		
2000	Vert	Rouge	Vert	Jaune	Jaune	Jaune	Bleu	Bleu		
2001	Vert	Rouge	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Vert	Bleu		
2002	Rouge	Rouge	Bleu	Vert	Jaune	Vert	Bleu	Bleu		
2003	Rouge	Rouge	Bleu	Vert	Jaune	Jaune	Jaune	Bleu		

Tableau 20 : Qualité annuelle des eaux du barrage Lekhal (1998-2003)

Les eaux du barrage Lakhel présentent une qualité moyenne en oxygène dissous pour les années 1999, 2000 et 2001, et une qualité très mauvaise pour les années 1998, 2002 et 2003. Ces eaux présentent aussi une bonne minéralisation dont la salinité est trop faible (RS inférieur à 1.2 g/l) et la concentration en nitrate est bonne pour toute la période d'analyse.

Une mauvaise qualité azotée (NH₄ et NO₂) est enregistrée pour toute la période d'analyse. Ces teneurs sont dues à l'oxydation des matières azotées. La teneur en DCO est trop élevée atteignant une qualité très mauvaise pour les années 2000 à 2003.

Qualité des eaux du barrage Ain Zada


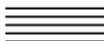
Evolution mensuelle de la qualité des eaux (année 2003)

Le suivi de la qualité des eaux du barrage Ain Zada est assuré par l'existence d'une station de surveillance de la qualité (code 150723) implantée sur l'Oued Boussellem. Le tableau 21 présente les résultats d'analyses effectués au niveau de cette station.

Paramètres	Matières organiques et oxydables				Matières azotées		Nitrate	Matière phosphorée	Paramètres physico-chimiques	
	O ₂ D	DCO	DBO ₅	MO	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	pH	RS
Janvier										
Février										
Mars										
Avril										
Mai										
Juin										
Juillet										
Août										
Septembre										
Octobre										
Novembre										
Décembre										

Tableau 21 : Qualité mensuelle des eaux du barrage Ain Zada pour l'année 2003

Source : ANRH (2005)

Remarque :  Manque de données  Sursaturation en oxygène

L'exploitation des bulletins mensuels de la qualité des eaux de barrages destinés à l'alimentation en eau potable établis par l'ANRH montre que les eaux du barrage de Ain Zada présentent une pollution organique exprimée en DCO pour les mois de février, mars, août et octobre. L'origine de cette pollution est due soit aux apports des polluants provenant des rejets d'eaux usées, soit au processus biologique (eutrophisation) par accumulation des éléments dans le réservoir du barrage.

Les concentrations en phosphate PO₄, au cours de l'année 2003 sont élevées. Cette dégradation en matière phosphorée s'explique par les apports externes (rejet des eaux usées).

Evolution annuelle de la qualité des eaux (1998-2003)

L'évolution annuelle de la qualité des eaux du barrage Ain Zada entre la période 1998 et 2003 est représentée dans le tableau 22.

Paramètres Années	Matières organiques et oxydables				Matières azotées		Nitrate	Matière phosphorée	Paramètres physico- chimiques	
	O ₂ D	DCO	DBO ₅	MO	NH ₄	NO ₂	NO ₃	PO ₄	PH	RS
1998	Red	Red	Blue	Yellow	Yellow	Green	Blue	Yellow	Blue	Blue
1999	Red	Red	Blue	Yellow	Yellow	Green	Blue	Yellow	Blue	Blue
2000	Red	Red	Green	Yellow	Yellow	Blue	Blue	Yellow	Blue	Blue
2001	Red	Red	Blue	Yellow	Yellow	Green	Blue	Yellow	Blue	Blue
2002	Green	Red	Blue	Yellow	Yellow	Green	Green	Yellow	Blue	Blue
2003	Green	Red	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Blue	Blue

Tableau 22 : Qualité annuelle des eaux du barrage Ain Zada (1998-2003)

Les eaux du barrage Ain Zada présentent une qualité moyenne en oxygène dissous pour les années 2002 et 2003, et une qualité très mauvaise pour les années 1998, 1999, 2002 et 2001. Le suivi annuel des paramètres analysés révèle une demande chimique en oxygène (DCO) qui est trop élevée pendant toute la période d'analyse.

La teneur en NH₄ est très élevée. Cette pollution est due à l'oxydation de la matière organique azotée. Nous remarquons une amélioration de la teneur en NO₂ en 2000 par rapport aux années 1998 et 1999. Cette amélioration est due à la diminution de l'oxydation de la matière organique azotée.

Qualité des eaux des Oueds

- Classe de qualité en un point

La qualité attribuée à un cours d'eau est faite par l'estimation sur des points précis qui seront ensuite généralisés à des tronçons du cours d'eau suivant le sens de l'écoulement de l'eau.

Selon l'ANRH, pour la cartographie des différents niveaux de pollution des cours d'eau, la qualité est attribuée suivant le sens de l'écoulement de l'oued pour la qualité organique et oxydable (M.OX).

La qualité azotée (M.A) et phosphorée (M.P) est représentée sur la figure 23 par des encadrés de couleurs et de code signalant le type de pollution (N et P).

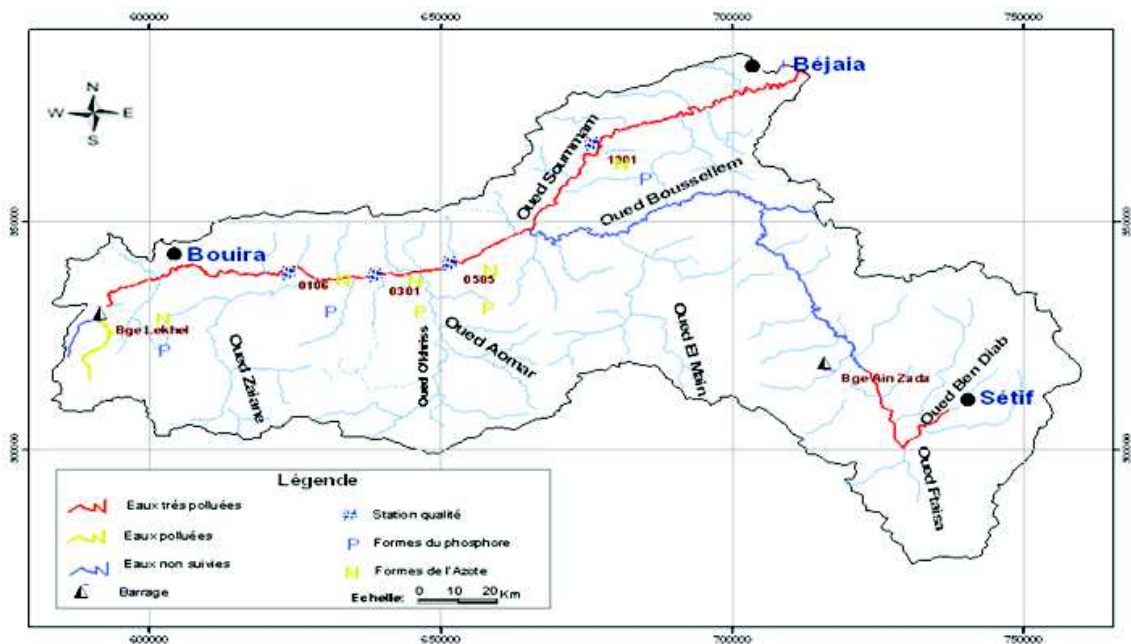


Figure 23 : Qualité des eaux superficielles

Source: ANRH (2001)

Etat de la pollution des oueds

Au cours de ces dernières années, la qualité des principaux cours d'eau du bassin de la Soummam a connue une dégradation importante. Afin de suivre l'évolution de la qualité des eaux du bassin, un réseau de surveillance composée de 06 stations a été mis en place par l'ANRH (2001) (figure 23). Cette qualité, est évaluée à partir de l'étude de nombreux paramètres qui traduisent plusieurs formes d'altération (matières minérales, organique et oxydables, azotées et phosphorées).

Une classe de qualité la plus pessimiste est attribuée à chaque station de surveillance selon la grille de qualité (tableau 18).

CONCLUSION

Les potentialités en eau du bassin sont évaluées à 837Hm^3 , dont 684Hm^3 pour les eaux superficielles et 153Hm^3 pour les eaux souterraines.

Le volume mobilisé au niveau des quatre barrages de la Soummam est de 314Hm^3 . En tenant compte de la capacité des retenues collinaires, en nombre de 73, qui est de l'ordre de $12,4\text{Hm}^3$. Le volume des forages en exploitation est de $179.30\text{Hm}^3/\text{an}$.

Le bassin de la Soummam compte actuellement deux grands périmètres d'irrigation en exploitation à savoir: les Aribis et M'Chedellah.

L'apport moyen interannuel mesuré à la station de Sidi Aïch situé à 40 km de l'embouchure de l'Oued Soummam est de $465,1\text{Hm}^3$.

Le bassin de la Soummam est caractérisé par une qualité moyenne à mauvaise au niveau de toutes les stations. Une mauvaise qualité azotée (NH_4 et NO_2) est enregistrée pour toute la période d'analyse (1998-2003) au niveau du barrage Lekhal et une teneur en NH_4 très élevée au niveau du barrage de Ain Zada durant cette même période.

L'Oued Soummam enregistre une pollution excessive compte tenu de l'importance des rejets domestiques et industriels qui se déversent quotidiennement dans l'oued.

La situation est certes préoccupante, mais il ne faut pas se contenter du constat. Les enjeux et défis sont stratégiques et nécessitent ainsi une politique rigoureuse avec des programmes tangibles fixant en priorité la protection de l'environnement et la préservation de la qualité de la ressource en eau.

CHAPITRE 4 : APPROCHE METHODOLOGIQUE

Dans ce qui suit, une présentation des différentes étapes méthodologiques suivies au cours de notre étude hydroclimatologie et de cartographie automatique est proposée.

4.1 ETUDE DE LA PLUVIOMETRIE

Les matériels utilisés dans notre étude sont deux logiciels présentés comme suit :

- XLSTAT : Un logiciel de statistique (1993) qui permet d'obtenir les matrices de corrélation entre les différentes stations de l'étude par la régression linéaire (produit d'Addinsoft) ;
- HYDROLAB : La méthode « Bouche trou » (Programme développé par Laborde en 1998, écrit en basic et présenté sous forme de macros sur Excel). Elle a été adoptée, compte tenu des résultats satisfaisants obtenus lors de son application aux données de 470 postes pluviométriques ayant servi à l'élaboration de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord.

Cette technique de comblement des lacunes consiste à établir des régressions multiples successives entre les valeurs mensuelles observées et les valeurs régionaux issus d'une A.C.P. (A.N.R.H., 1993 ; Laborde, 1997 ; Assaba et Laborde, 2000).

- Régression linéaire

La régression linéaire permet d'établir une relation mathématique pouvant exister entre deux stations (pluviométriques) x variable indépendante et y dépendante de la première variable (linéairement).

La régression linéaire simple a pour objet non seulement d'estimer la fonction de régression relative au modèle choisi, mais de tester la fiabilité des estimations obtenues.

L'équation de la droite de régression obtenue à partir de la méthode des moindres carrés est de la forme :

$$y = ax + b$$

a : pente de la droite de régression ;

b : ordonnée à l'origine de la droite de régression.

Avec :

$$a = \frac{k \sum xy - \sum x \sum y}{k \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{\sum y \sum x^2 - \sum x \sum xy}{k \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Le coefficient de corrélation (R) étant égal à :

$$R^2 = a \frac{k \sum xy - \sum x \sum y}{k \sum y^2 - (\sum y)^2}$$

k : Nombre de mesure commune aux deux stations x et y ;

x : Précipitations à la station de base x ;

y : Précipitations à la station y à partir de k valeurs ;

R : Coefficient de corrélation entre x et y sur les couples observés simultanément ($-1 < R < 1$).

Si $R = 1$ la corrélation est parfaite ;

Si $R = 0$ les variables sont dites non liées.

· **L'analyse en composantes principales ACP**

L'objectif est de combler les lacunes dans une matrice de données dont laquelle, certaines lacunes seront remplacées par une analyse en composantes principales (Laborde, 1998).

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique qui permet de synthétiser l'information en une ou plusieurs composantes, de telle sorte que toutes les variables s'expriment en combinaison linéaire de ces composantes, cette combinaison nous permettra de reconstituer les mois manquants.

Par rapport aux méthodes classiquement en vigueur, les avantages sont indéniables (Laborde, 1998) :

- au lieu de travailler sur des régressions simples sur un nombre inextricables de couples de variable, nous travaillons pour chaque variable sur une seule régression multiple à 2, 3 ou 4 variables explicatives ;
- les valeurs prises par les composantes principales filtrent la plupart des erreurs contenues dans les séries de données ;
- l'automatisation de ces démarches est très simple. Elle peut très facilement être réalisée avec le logiciel Hydrolab (Laborde, 1998) ;
- après un examen critique minutieux des fichiers de données pluviométriques et grâce au logiciel Hydrolab, les périodes sans observations présentes dans les séries de données, seront comblées à l'aide de la méthode « bouche trou ».
- Rappel de la méthode de comblement des lacunes pluviométriques mensuelles à l'aide de l'A.C.P

Chaque observation mensuelle manquante $x(i,j)$ est remplacée dans une première étape par la moyenne interannuelle $Mx0(j)$, calculée sur les seules années réellement observées (valeurs en racine carrée). Nous obtenons alors une première matrice complète $[x0]$ sur laquelle nous effectuons une A.C.P. qui permet d'obtenir les projections des variables (les stations) $[a]$ et des observations (les mois) $[c]$ sur les quatre seules premières composantes principales pouvant avoir une signification physique. Nous obtenons également les matrices des moyennes $[Mx1]$ et des écarts-types $[Sx1]$.

Il devient alors possible de reconstituer chaque observation manquante par une nouvelle valeur estimée $xel(i,j)$:

$$xel(i,j) = \{ Mx1(j) + Sx1(j) \times \{ a1(1,j) \times c1(i,1) + a1(2,j) \times c1(i,2) + a1(3,j) \times c1(i,3) \} \}$$

Les valeurs $x_{e1}(i, j)$ sont de meilleures estimations que $Mx0(j)$ car elles tiennent compte des observations aux autres stations pour l'année j . L'on peut donc réitérer le processus en remplaçant dans la matrice $[x0]$ chaque $Mx0(j)$ par les $x_{e1}(i, j)$ adaptés. Nous obtenons ainsi une nouvelle matrice $[x1]$. Nous recommençons alors une A.C.P. sur la nouvelle matrice $[x1]$ permettant d'obtenir de nouvelles valeurs estimées $x_{e2}(i, j)$, tirées des nouvelles matrices $[c2]$ (projections des variables, $[c2]$ (projections des observations), $[Mx2]$ (moyennes) et $[Sx2]$ (écarts-types).

4.1.1 Caractéristiques des données

Les données pluviométriques et hydrométriques proviennent de la banque de données de l'organisme responsable du réseau pluviométrique à savoir l'A.N.R.H. et les paramètres climatiques sont extraits des bulletins de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRAA) parvenus de l'O.N.M.

Nous avons pu recueillir de l'ANRH et des bulletins (décadaires, mensuels et annuels) de l'ONM les informations suivantes :

- les données mensuelles et annuelles enregistrées sur le bassin versant de la Soummam et sa périphérie, et leurs durées de fonctionnement ;
- les coordonnées géographiques (latitude, longitudes et les altitudes) ;
- la localisation des postes pluviométriques sur les bassins N° 15, 02, 03, 05 et 09.

4.1.2 L'étude de la période de référence (1968 / 2004)

Les données pluviométriques mises à notre disposition par l'ANRH, portent sur 65 stations réparties de manière plus ou moins irrégulière dans le bassin de la Soummam et à sa périphérie, dont 54 se situent à l'intérieur du bassin et 11 à l'extérieur. Ces données s'étendent entre 1900 et 2004 et sont structurées suivant l'année hydrologique allant du 1^{er} septembre au 31 août (adapté aux pluies de l'Algérie du fait de l'absence quasi-total des précipitations pendant l'été).

Cependant, l'instabilité de fonctionnement de ces stations, les lacunes et les erreurs entachant les séries d'observations, nous conduit à effectuer un minutieux travail de sélection au départ.

Le réseau de station pluviométrique est relativement dense, mais les périodes de leur fonctionnement différent. A cet effet un premier travail consiste à définir la période la plus longue possible sur laquelle on puisse disposer de données suffisantes en qualité et en quantité.

Pour le choix de la période de référence, il est préférable de tracer un graphique représentant les stations pluviométriques en service par année. Le graphe synoptique (figure 24) illustre très clairement le manque d'information (moins de 40 %) durant la période allant de 1900 à 1967 alors qu'entre 1968 et 2004, nous constatons que 60 % de stations sont disponibles.



Figure 24 : Evolution de 1900 à 2004 du nombre de stations disposant d'observations pluviométriques

Nous nous sommes alors résolus à retenir une sélection de 35 postes (figure 25) possédant une série de mesures suffisantes pour mener à bien cette étude, c'est-à-dire 36 ans tel que préconisé par l'Office Mondiale de Météorologie (O.M.M.) (Castany, 1963).

Les caractéristiques des stations pluviométriques retenues figurent dans le tableau 23.

Tableau 23 : Caractéristiques générales des stations pluviométriques (Période commune : 1968-2004)

Stations	Code	Coordonnées Lambert		Z (m)
		X (km)	Y (km)	
SOUR EL GHOZLANE	15 01 01	590,60	316,45	882
EL HACHIMIA	15 01 03	600,65	325,10	730
TAGHDIT S.KHEMIS	15 02 01	616,50	303,20	1055
EL ESNAM	15 02 04	620,40	335,50	435
BOUIRA	15 02 08	616,00	337,25	520
AIN NESSISSA	05 01 01	583,25	290,35	680
DIRAH CENTRE	05 04 02	595,35	299,20	800
KHABOUZIA	09 04 01	579,15	334,35	720
SOUK EL KHEMIS	09 04 02	584,00	343,40	782
M'CHEDALLAH	15 03 01	640,90	341,70	450
PORTES DE FER	15 04 01	650,70	324,20	500
BEN DAOUD	15 04 02	633,85	310,85	850
TAZMALT	15 05 01	652,75	344,25	324
IGHIL ALI	15 05 03	658,90	338,95	700
D ^{ne} MAOUCHE AHMED	15 10 04	692,30	373,05	71
SEDDOUK	15 10 06	678,05	362,15	370
TIFRA	15 10 07	678,75	375,75	450
AIT AICHA	02 15 09	661,80	373,90	1000
AIN ARNAT	15 06 07	736,50	323,95	1029
BOUIRA - COLIGNY	15 06 08	732,00	326,65	1017
FERMATOU	15 06 10	742,00	328,60	1030
MAHOUANE	15 06 11	737,75	332,95	1150
ZAIRI	15 06 13	745,75	337,50	1130
TIXTER	15 06 14	715,00	308,20	960
BOU BIREK	15 07 03	689,60	354,50	500
AIN ABESSA	15 07 06	733,10	336,40	1100
BIR KASDALI	15 07 07	709,50	318,40	980
SIDI EMBAREK	15 08 01	699,15	313,80	1011
ZEMMORAH	15 08 02	692,80	331,80	950
TENIET ENASR	15 08 07	671,20	327,45	1021
SIDI YAHIA	15 09 04	672,10	348,50	255
AMOUCAS	03 02 04	743,60	346,15	800
TIZI N'BRAHAM	03 02 06	714,45	354,10	860
EL HAOURANE	05 08 02	653,40	295,10	803
MEDJANA	05 09 06	677,75	316,20	1042

ANRH (2005)

L'intervalle de variation des altitudes réelles des postes pluviométriques retenus est considérable (station de D^{ne} Maouche Ahmed sur le sub littoral : 71 m ; station de Mahouane sur les hauts plateaux 1150 m). Il y a lieu de préciser que 60 % des postes sont localisés à une altitude supérieure à 770.2 m (altitude médiane).

La densité du réseau pluviométrique du bassin versant de la Soummam est relativement moyenne, soit une station pour 250 km² vue que l'OMM (1970) préconise pour les régions montagneuses méditerranéennes une surface de 100 à 200 km².

4.1.3 Extension des séries

L'étude du climat et de sa variabilité nécessite de disposer de longues et nombreuses séries d'observations. Malheureusement nous ne disposons jamais de séries de données parfaitement fiables ni continues. La première étape dans toute analyse de données est donc de vérifier la fiabilité des données et la seconde de combler les lacunes d'observations (Laborde, 1998).

Les statistiques ne permettent pas de détecter ces erreurs. Elles permettent seulement de mettre en lumière des anomalies par rapport à des hypothèses de distribution statistique et pour un certain seuil de détection (Laborde, 1998).

Avant de procéder au comblement des données, il est préférable d'élaborer une matrice des coefficients de corrélation par la méthode de régression linéaire (à l'aide du logiciel XLSTAT), à l'échelle mensuelle avec des stations de bases (mesures complètes et correctes).

Le coefficient théorique R_a est de 0.45, au-delà de cette valeur nous pouvons dire que tous les coefficients R ($0.6 \leq R \leq 0.9$) obtenus entre les diverses stations sont significatifs.

4.1.4 Test d'homogénéité des données

Dans les séries de données climatiques se glissent des erreurs qui peuvent avoir des origines multiples (erreurs de lecture, erreurs de report,...etc.). Classiquement nous différencierons les erreurs accidentelles et les erreurs systématiques (Laborde, 1998).

Il existe un certain nombre de tests statistiques pour détecter l'existence de ces hétérogénéités parmi lesquels : SPEARMAN, WILCOXON, MANN WITHNEY,...etc. Les méthodes des doubles cumuls et des cumuls des résidus font ressortir les hétérogénéités, permettant de les dater et de les chiffrer, ce qui peut conduire à corriger les observations originales (Anonyme, 2002).

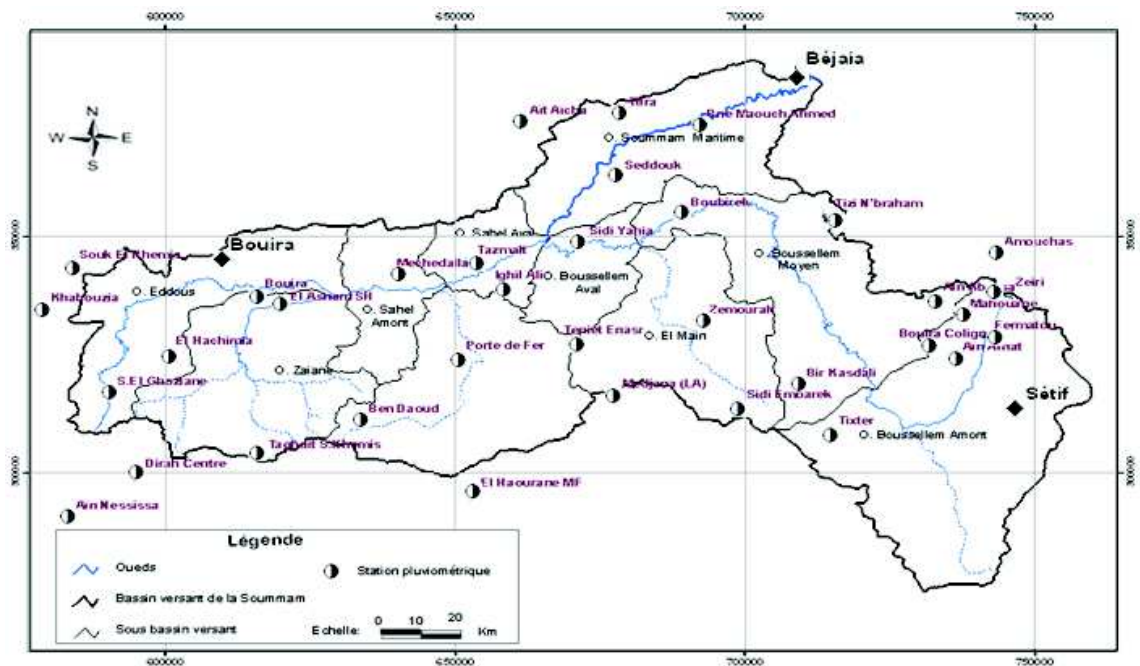


Figure 25 : Localisation des postes pluviométriques

Test de WILCOXON

Le test de Wilcoxon est un test non paramétrique qui utilise la série des rangs des observations au lieu de la série de leurs valeurs. Le test repose sur le principe suivant : Si l'échantillon X (de taille N_1) est issu d'une même population que Y (de taille N_2), alors l'échantillon $X \cup Y$ (l'union des deux séries) en est également issu. La statistique de Wilcoxon est la somme des rangs du premier échantillon (W_x).

Si W_x est inférieur à la valeur critique, l'hypothèse nulle est alors acceptée. Le procédé du test de Wilcoxon est le suivant (Sari Ahmed, 2002) :

- diviser l'échantillon en deux sous échantillons (X et Y) de tailles N_1 et N_2 avec $N_1 \leq N_2$;
- classer l'échantillon $X \cup Y$ par ordre croissant ;
- additionner les rangs des valeurs appartenant au premier sous échantillon X, d'où W_x :

$$W_x = \sum rang(x)$$

Wilcoxon a montré que dans le cas où les deux échantillons X et Y constituent une série homogène, la quantité W_x est comprise entre deux bornes W_{max} et W_{min} tel que :

$$W_{min} = [(N_1 + N_2 + 1)(N_1 - 1)] / 2 - U_{(1-\alpha/2)} \sqrt{N_1 N_2 (N_1 + N_2 + 1) / 12}$$

$$W_{max} = (N_1 + N_2 + 1)N_1 - W_{min}$$

Où :

$U_{(1-\alpha/2)}$: représente la valeur de la variable centrée réduite de Gauss prise au seuil de 95%.

D'où, pour $\alpha = 95\%$; $U_{(1-\alpha/2)} = 1,96$

· Test des doubles cumuls ou test de double masse « Double mass curve »

Le test des doubles cumuls repose sur le principe qu'un changement dû à des causes météorologiques ne changera pas la pente de la courbe puisque les stations témoins seront affectées de la même façon ; ainsi seul le changement occasionné par des erreurs systématiques conduirait à une variation significative de la pente (Anonyme, 2002).

Les stations témoins doivent vérifier les critères suivants :

- une liaison plus significative avec les séries des stations à vérifier ;
- les postes considérés soient situés dans la même région climatique ;
- les séries des stations doivent être homogènes.

Ce dernier critère peut être vérifié à l'aide du test statistique tel que le test de WILCOXON qui est utilisé dans notre cas.

La courbe du double cumul permet de comparer la tendance à long terme de la station visée par rapport à la tendance des stations témoins.

L'application de cette méthode suppose une liaison positive significative entre les totaux annuels pluviométriques et que les deux postes considérés soient situés dans la même région climatique (Brunet-Moret, 1971).

Les valeurs des précipitations annuelles et les précipitations cumulées correspondantes sont résumées dans un tableau (voir annexe 6).

Le double cumul consiste à tracer le graphe des cumuls, précipitations cumulées de la station à vérifier en fonction des précipitations cumulées à la station témoin.

Si les points sont distribués de façon linéaire, nous concluons que la série est homogène; au contraire, s'il apparaît une ou plusieurs cassures dans la distribution, la série n'est pas homogène et nous établissons alors des hypothèses autour de l'anomalie relevée : déplacement du pluviomètre, modification de l'environnement du poste, changement d'éprouvette, changement d'observateurs.

Les changements occasionnés par les erreurs systématiques à la station étudiée conduiraient à une variation significative de la pente. Les valeurs seront corrigées en prolongeant la courbe la plus fiable selon la formule :

$$100 Pa = \frac{m.Po}{m'}$$

Avec :

- Pa : précipitation ajustée ;
- Po : précipitation observée ;
- m : la pente de la courbe dans la meilleure portion ;
- m' : la pente dans la portion à corriger.

- Détection des anomalies systématiques

Cette méthode beaucoup plus puissante que la méthode des doubles masses, les anomalies systématiques sont détectées sur la base de l'analyse du cumul des résidus de régression

Par hypothèse nous disposons d'une série temporelle de mesures (x) exemptes d'erreurs, et que nous nous proposons de vérifier une autre série (y) de valeurs raisonnablement corrélées à (x) des pluies annuelles sur des postes pluviométriques voisins.

On définit une nouvelle variable Z_i qui soit le cumul des i premiers résidus de régression ε_i :

$$Z_i = \sum_{j=1}^i \varepsilon_j$$

Où

$$\varepsilon_i = y_i - \bar{y}_x'$$

Avec :

\bar{y}_x' : Moyenne conditionnelle des y liées par x ;

ε_i : Erreur résiduelle devant être distribuée selon une loi normale de moyenne nulle et écart type σ_z .

La variable Z_i est donc la somme de i réalisation d'une variable aléatoire gaussienne ε de moyenne nulle et d'écart-type :

$$\sigma_z = \sigma_y \sqrt{1-r^2}$$

σ_y : Ecart type conditionnel des y liés par x

La variable Z_i sera donc elle aussi, une variable aléatoire gaussienne. Il est évident que la moyenne de Z_i est nulle quelque soit i . Par contre les tirages successifs de ε , se font sous la contrainte d'avoir $Z_{n_\varepsilon} = 0$. Ceci se traduit dans l'expression de l'écart-type de Z :

$$\sigma_z = \sigma_y \sqrt{1-r^2} \times \sqrt{\frac{i(n_\varepsilon - i)}{n_\varepsilon - 1}}$$

Si on se fixe par exemple un intervalle de confiance à 98 %, il y a deux chances sur cent pour que Z_i soit extérieur au segment.

Lorsque j varie, le lieu des limites des segments ayant la même probabilité de contenir des ellipses passant par $Z = 0$ pour $i = 0$ et $Z = 0$ pour $i = n$.

L'Analyse en Composantes Principales va nous permettre de "filtrer" l'information contenue dans notre matrice de données. Les composantes principales sont calculées dans l'ordre décroissant des valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation (Laborde, 1998).

4.1.5 Analyse statistique des séries

· Ajustements des données à une loi de probabilité

Pour mieux cerner cette irrégularité inter annuelle des précipitations qui a un rôle essentiel et décisif sur l'écoulement et afin de caractériser le régime des précipitations annuelles, nous allons essayé de trouver une loi d'ajustement de la distribution des pluies annuelles dans le but d'aboutir à une estimation des paramètres d'ajustement et calculer des variables réduites.

L'étude statistique des pluies moyennes annuelles est basée sur la détermination des caractéristiques de l'échantillon et la recherche d'une loi théorique d'ajustement, qui nous renseigne sur la distribution des variables de cet échantillon (Laborde, 2000).

· Ajustement à une loi normale

La loi normale ou loi de gauss est une distribution symétrique par rapport à la moyenne, elle est entièrement définie par la moyenne et l'écart type.

Cette loi est définie sur l'intervalle $]-\infty, +\infty[$ elle admet pour fonction de répartition $F(x)$ donnée par :

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

Avec :

$$u = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}$$

- u : variable réduite de Gauss ;
- $F(x)$: fonction de répartition donnée par les tables de Gauss ;
- x : variable pluviométrique ;
- x :] $-\infty$, $+\infty$ [

Et

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Où :

- \bar{x} : moyenne de la série pluviométrique ;
- n : nombre d'observation ;
- σ : écart type de la série pluviométrique.

- Ajustement à une loi log-normale

Nous pouvons généraliser la loi de Gauss et la rendre dissymétrique, par des changements de variable, qui consiste à prendre comme variable gaussienne le logarithme ou une fonction linéaire du logarithme de la variable étudiée.

- Ajustement à une loi racine normale

L'ajustement à une loi racine-normale consiste à prendre la racine des valeurs d'une série de données et les ajuster à une loi normale. Cette technique est utilisée dans la pratique quand une série de données est symétrique mais non gaussienne.

Cette loi se ramène à une loi de Gauss par un changement de variable, la fonction de répartition est donnée par :

$$F(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du$$

Avec :

$$u = \frac{\sqrt{P} - \overline{\sqrt{P}}}{\sigma_{\sqrt{P}}}$$

- u : variable réduite de Gauss ;

C'est la variable \sqrt{P} qui suit une loi de Gauss à deux paramètres :

- $\overline{\sqrt{P}}$: La moyenne des racines carrées des pluies ;
- $\sigma_{\sqrt{P}}$: L'écart type des racines carrées de la série d'observation.

Cette loi est définie sur l'intervalle $[0, +\infty [$ et ne peut donc convenir qu'à une population positive.

Tous les calculs (quantiles, intervalle de confiance), se feront sur la variable transformée \sqrt{P} .

La pluie médiane est donnée par : $\overline{\sqrt{P}}$

4.2 ETUDE HYDROLOGIQUE

4.2.1 Données climatiques des stations professionnelles (ONM)

La quantité et la qualité des données climatiques conditionnent les résultats de toutes études du bilan hydrologique. Pour mener notre travail, nous avons eu recours aux données des stations professionnelles qui sont plus ou moins complètes.

Dans le bassin versant de la Soummam, nous disposons que de trois stations professionnelles complètes : Béjaïa, Bouira et Sétif, considérant ce nombre de stations insuffisant, nous avons estimé utile d'y rajouter une autre à l'extérieur du bassin, celle de Bordj Bou Arreridj (BBA), leurs caractéristiques générales figurent dans le tableau 24.

Les paramètres climatiques sont extraits des bulletins de l'ONM ; service chargé de l'édition des bulletins quotidiens des informations météorologiques, à différentes périodes d'enregistrement: 1990-2004 (Bouira) et 1988-2004 (Béjaïa, BBA et Sétif). Les données climatiques sont reportées dans un tableau (voir annexe 9-2).

Tableau 24 : Caractéristiques des stations climatiques

Stations	Coordonnées Lambert		
	X (Km)	Y (Km)	Z (m)
Bouira	608	343	555
Béjaïa	711	382	2
BBA	677	309	928
Sétif	729	323	1033

Source : ONM (2006)

4.2.2 Evapotranspiration

- Evapotranspiration Potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) désigne la quantité d'eau rejetée dans l'atmosphère tant par évaporation directe du sol, que par transpiration des organes aériens des plantes. Elle constitue la quantité maximale de vapeur d'eau pouvant être produite (Chemlal, 1983).

Parmi les facteurs influençant l'évaporation et son intensité, on peut citer :

- la radiation solaire ;
- la température de l'air et de l'eau;
- l'humidité de l'air ;
- la pression atmosphérique ;
- la vitesse des vents.

Les méthodes d'évaluation de l'évapotranspiration peuvent être divisées en trois groupes :

- mesures directes in situ; en certains sites de mesures. L'extrapolation de ces mesures ponctuelles à une région se fait, en général par des coefficients d'ajustements;
- analytiques, basées sur le bilan hydrique ou sur le bilan énergétique;
- empiriques, basées sur l'analyse statistique des observations disponibles concernant certains éléments physiques ou atmosphériques facilement mesurables. Des analyses de corrélation conduisent à développer des relations mathématiques entre ces éléments et l'intensité et la variabilité de l'évaporation.

Plusieurs formules (formule de PENMAN, de TURC ou de THORNTHWAITE) permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures climatologiques. La plus complète et la plus complexe est certainement la formule de Penman basée sur la notion de bilan énergétique. Cependant, le nombre de paramètres utilisés par cette formule (différentes températures, hygrométrie, rayonnement global, albédo, etc.) font que son emploi est rarement possible compte tenu des mesures disponibles.

- Evapotranspiration réelle (ETR)

On appelle évapotranspiration réelle, la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

La part de l'évapotranspiration réelle (ETR) dans un bilan hydrologique est toujours extrêmement délicate à déterminer. Son appréciation doit se faire le plus possible indépendamment des autres termes du bilan dont les valeurs restent elles aussi entachées d'une incertitude plus ou moins forte. Il est donc peu pertinent de caler directement la quantité d'eau évaporée d'un système à partir des différentes valeurs des autres paramètres du bilan (Dumas, 1998).

- Méthode du bilan de Thornthwaite

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU); cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU qui est de l'ordre de 0 à 200mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100mm (Laborde, 2000a).

On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant (ETP=ETR). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement.

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'ETP et de la RFU :

Si $P > ETP$, alors :

• $ETR = ETP$

• il reste un excédent ($P-ETP$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q.

Si $P < ETP$:

• on évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit :

$$ETR = P + \min(RFU, ETP-P)$$

$$RFU = 0 \text{ ou } RFU + P - ETP$$

Si $RFU=0$, la quantité ($Da=ETP-ETR$) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Pour établir ce bilan, il faut se donner la RFU maximale en fonction de la nature du sol. Par ailleurs, il faut connaître l'état de la RFU à la fin du mois antérieur au début de l'établissement du bilan. On tient alors l'un des deux raisonnements suivants :

- si la RFU doit être pleine un jour, ce sera à la fin de la période durant laquelle on a pu la remplir, c'est-à-dire à la fin du dernier mois où $P > ETP$;
- si la RFU doit être vide un jour, ce sera à la fin de la période durant laquelle on a pu la vider, c'est-à-dire à la fin du dernier mois où $P < ETP$.

4.2.3 Bilan hydrologique

Le bilan de l'eau global a pour but principal d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi, pour déterminer le bilan de la région d'étude il est indispensable d'évaluer ses composantes.

L'équation classique du bilan hydrologique pour les conditions moyennes annuelles s'écrit comme suit :

$$P = E + R + I \pm \Delta S$$

Avec :

- P : Précipitations moyennes annuelles (mm) ;
- E : Evapotranspiration réelle moyenne (mm) ;
- R : Ruissellement moyen annuel (mm) ;
- I : Infiltration moyenne annuelle (mm) ;
- ΔS : Variations des réserves (m).

Afin de calculer le débit moyen annuel d'exhaure des quatre stations. Nous avons eu recours à la méthode empirique de Tixeront-Berkaloff.

- Formule de Tixeront-Berkaloff

Le raisonnement tenu par ces deux chercheurs (Laïssaoui, 2008) est le suivant:

- lorsque les précipitations augmentent, le ruissellement tend à les égaler, déduction faite de l'évapotranspiration plafonnée à la valeur de l'ETR ;

- lorsque les précipitations tendent vers zéro, le ruissellement tend aussi vers zéro et le rapport du ruissellement à la pluviométrie tend vers zéro.

L'expression de la formule est la suivante :

$$R = \frac{P^3}{3ETP^2}$$

Avec :

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (mm).

Pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler, un indice qui synthétise au mieux les termes du bilan hydrologique est souvent calculé (Hadjou, 2008): le coefficient de ruissellement Cr, il est défini comme suit :

$$Cr = R / P$$

Cr est fortement influencé par la couverture du sol, de façon générale, il varie entre 0 et 1 mais peut prendre des valeurs supérieures à 1 en milieux karstiques.

4.3 CARTOGRAPHIE NUMERIQUE

Les méthodes d'analyse de données de cartographie automatique sont utilisées pour le passage d'une information mesurée, ponctuelle et brute, à une information traitée, interpolée et numérisée. Celle-ci est indispensable pour une connaissance valable et continuellement mise à jour des éléments du climat et de la ressource en eau.

4.3.1 Méthodes d'estimation des précipitations

La précipitation est l'une des données climatiques qui pose le plus de problème pour l'interpolation, en raison de sa distribution irrégulière à la fois dans le temps et dans l'espace et de ces relations fluctuantes par rapport aux facteurs extérieurs (l'orographie, l'exposition, ...etc). En effet, à l'échelle du bassin versant, l'estimation de la quantité des pluies tombées peut être faite par plusieurs méthodes, parmi elles :

- **La Méthode Aurelhy**

La création d'une banque de paramètres, propre aux stations pluviométriques d'une région donnée, constitue le fondement de la méthode. Etablie une fois pour toutes, elle suppose évidemment de pouvoir disposer d'un MNT, permettant d'explorer l'espace de façon optimale.

Parmi l'abondance des paramètres envisageable, de nombreux auteurs ont montré l'intérêt d'utiliser une altitude lissée, traduisant au mieux le trajet des flux atmosphériques (Schérer, 1977 ; de Montmollin et al. 1980 ; Humbert et Paul, 1982 ; Laborde, 1984 ; Marand et Zumstein, 1990, in Humbert. 1995).

Cette méthode est formée de deux principales étapes : une analyse en composantes principales « ACP » réalisée à l'aide d'un MNT. Elle permet de définir les éléments déterminants du relief pour la pluviométrie (zone concave, zone convexe, ligne de crête,

versant, ...etc.). La pluie est ensuite estimée par régression linéaire multiple suivant les premiers constituant de cette ACP, les résidus sont krigés (Bénichou et Le Breton, 1987).

- La Méthode de Krigeage

Le krigeage est une méthode qui calcule l'auto-corrélation entre les valeurs ponctuelles et calcule ensuite pour chacun des points de la grille, une estimation des valeurs dont la variance est minimum. En théorie, le krigeage est la méthode qui produit les estimations les plus précises. Le krigeage est l'une des méthodes les plus flexibles et est utile pour interpoler presque n'importe quel type de données.

Pour la plupart des ensembles de données, le krigeage avec un variogramme linéaire est tout à fait efficace. C'est la méthode qui est recommandée dans la plupart des circonstances. Elle donne la meilleure interprétation d'ensemble de la plupart des séries de données (supérieures à 50 stations). Toutefois la méthode peut s'avérer lente lorsqu'on l'applique à de grands ensembles de données.

4.3.2 Régression multiple

Les régressions multiples sont d'un grand intérêt en hydrologie pour étudier les relations entre les variables hydrologiques, climatologiques, morphologiques, etc. Leur utilisation peut se classer sous trois rubriques (Touchebeuf De Lussigny, 1971) :

- extension dans le temps de séries d'observations hydrologiques qui sont de trop courte durée ou comportent des lacunes;
- prévisions de données hydrologiques (apports mensuels, crues, étiages, etc.) en fonction des conditions hydrométéorologiques observées au moment de la prévision;
- extension géographique à des bassins non observés des caractéristiques hydrologiques déterminées sur divers bassins versants de régime analogue.
- Démarche cartographique adoptée

Le modèle de régression linéaire multiple (RLM) est une technique qui permet de décrire la liaison entre la variable dépendante ou expliquée et un ensemble de variables explicatives. Il s'agit d'une analyse statistique dans un espace à plusieurs dimensions et constitue une simple extension de régressions polynomiales et de l'analyse des tendances de surface.

Soit une variable Y que l'on veut relier à m variables X par le modèle linéaire suivant la forme (Holder, 1985, in Riad, 2003) :

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_mX_m + \varepsilon$$

Avec :

Y : la variable dépendante ;

B_m : les coefficients de régressions partiels ;

m : le nombre de variables indépendantes ;

ε : les valeurs des résidus (différence entre les données réelles et estimées).

Dans le but de déterminer les relations qui existent entre le régime hydrologique et les caractéristiques physiographiques des bassins versants, une analyse statistique a permis d'établir ces relations à partir d'un modèle de régression multiple.

La méthode consiste dans la technique d'interpolation par 'Krigage' en tenant compte de trois facteurs topographiques de la région considérée (longitude, latitude et altitude) pour les variables climatologiques et hydrologiques.

Les techniques en question sont mises en œuvre dans le cadre de ce travail pour étudier, à l'échelle du bassin versant de la Soummam, les termes principaux du bilan hydrologique (précipitations, écoulement et déficit d'écoulement), calculés en chaque nœud d'une grille du modèle numérique d'altitude (M.N.A.).

4.3.3 Cartographie de l'écoulement annuel à partir de la connaissance du déficit d'écoulement de Turc

D'une valorisation de l'information disponible sur les précipitations et l'évapotranspiration, elle-même valorisée sur la base des données géo-topographiques, il devient possible d'aboutir à une cartographie automatique des apports hydrologiques des cours d'eau. Par ailleurs, ces outils sont mis à profit en vue d'une approche cartographique du bilan hydrique (méthode de Thornthwaite) pour quantifier les déficits en eau.

Intérêt de l'approche

Le calcul de bilans globaux sur une période moyenne de plusieurs années consécutives autorise à appliquer la relation $E = P - D$, les pertes et gains par infiltration se compensant mutuellement sur un cycle hydrologique plus ou moins long (Remenieras, 1982). Ainsi, en tout point du réseau hydrographique, les contributions à l'écoulement (E) sont calculées en soustrayant l'évaporation (ETR ou D) des précipitations (P).

Cette méthode conduisant à la quantification des éléments du bilan hydrologique et à sa représentation cartographique avait été déjà initiée en 1979 par l'Université de Lausanne (Montmollin F. et al. 1979 in Mebarki, 2005).

Aujourd'hui, cette technique est aisément et assez rapidement utilisable à l'aide d'un logiciel, qui facilite l'interpolation des données et leur cartographie automatique. La prise en compte du relief à travers le MNA, constitue un atout supplémentaire dans le cadre de notre étude hydrologique du bassin de la Soummam.

La combinaison de la grille du déficit d'écoulement (D) et celle des précipitations (P) déjà disponible, permet d'obtenir par différence une grille des lames d'écoulement annuel moyen

($E = P - D$) (figure 26).

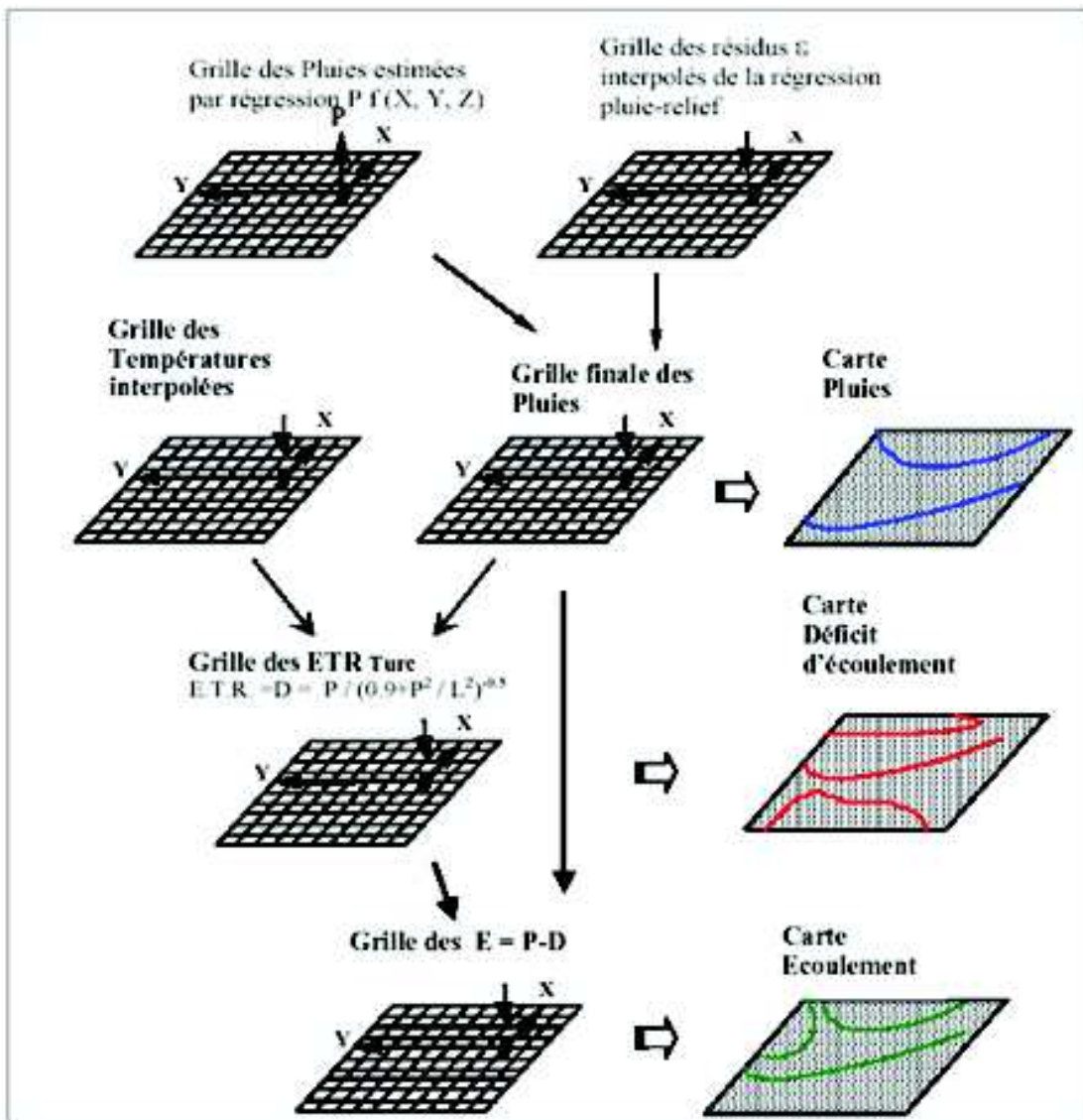


Figure 26 : Schéma de construction de la carte de l'écoulement annuel par combinaison des grilles de P et DTurc

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE

INTRODUCTION

Après avoir défini le contexte géographique, géologique et l'étude des ressources en eaux, nous abordons le domaine de l'acquisition des données et de leur traitement. Dans la région d'étude les données sont discontinues et très chaotiques. Des contrastes importants entre années déficitaires et années normales rendent les analyses statistiques délicates.

Il y a lieu de préciser que la collecte des données, leur mise en forme, leur critique et leur homogénéisation ont toujours constitué des opérations longues et fastidieuses.

L'étude des précipitations est basée sur l'analyse statistique des données pluviométriques enregistrées sur les principales stations du bassin versant étudié afin d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

5.1 Analyse des résultats

Nous reprenons ci-dessous les résultats obtenus après avoir établi par le moyen de la méthode "double masses et cumul des résidus " une vérification complète de l'homogénéité des stations pluviométriques avec une station de référence : la station de Bouira-Coligny (150608).

Dans l'ensemble, avec évidemment une certaine dispersion des points expérimentaux, la plupart des stations montrent une bonne linéarité, nonobstant les stations 150610, 150614, 150904 et 050906 (annexe 1) où nous constatons des cassures.

Le test statistique de WILCOXON a été employé pour vérifier l'homogénéité des séries d'observations plus ou moins douteuses comme illustré par la figure 27.

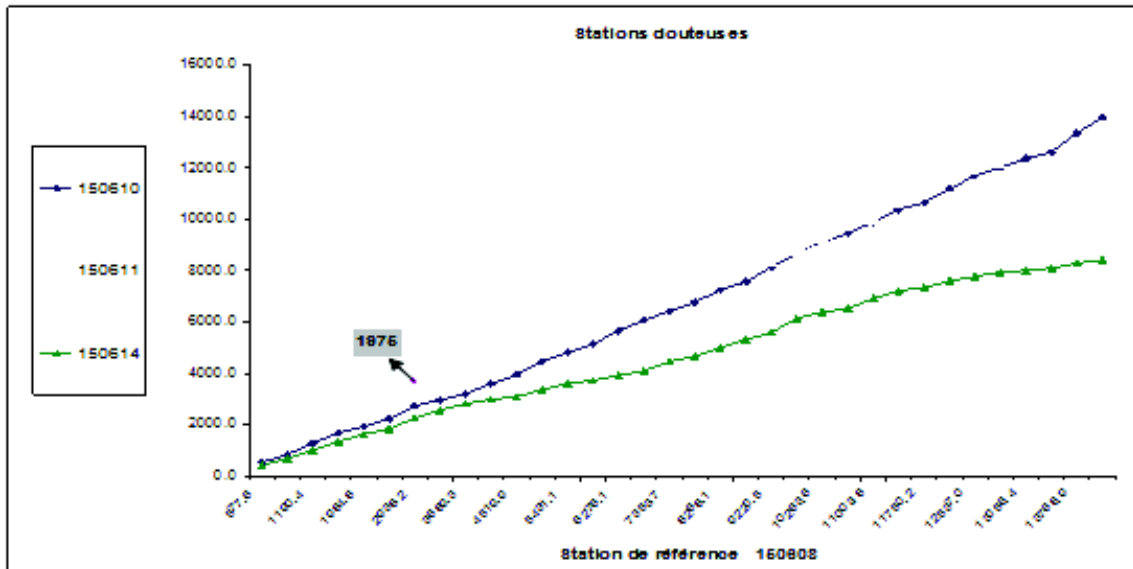


Figure 27 : Stations hétérogènes

L'absence d'archives ne permet de tirer aucune conclusion précise sur les causes d'anomalies, alors dans la mesure où la période antérieure à la cassure est la plus longue, on a jugé plus raisonnable de corriger la période postérieure à la cassure, figures 28 et 29 [cas de la station Mahouane (150611)]. De la même façon, les autres séries comportant des anomalies ont été homogénéisées.

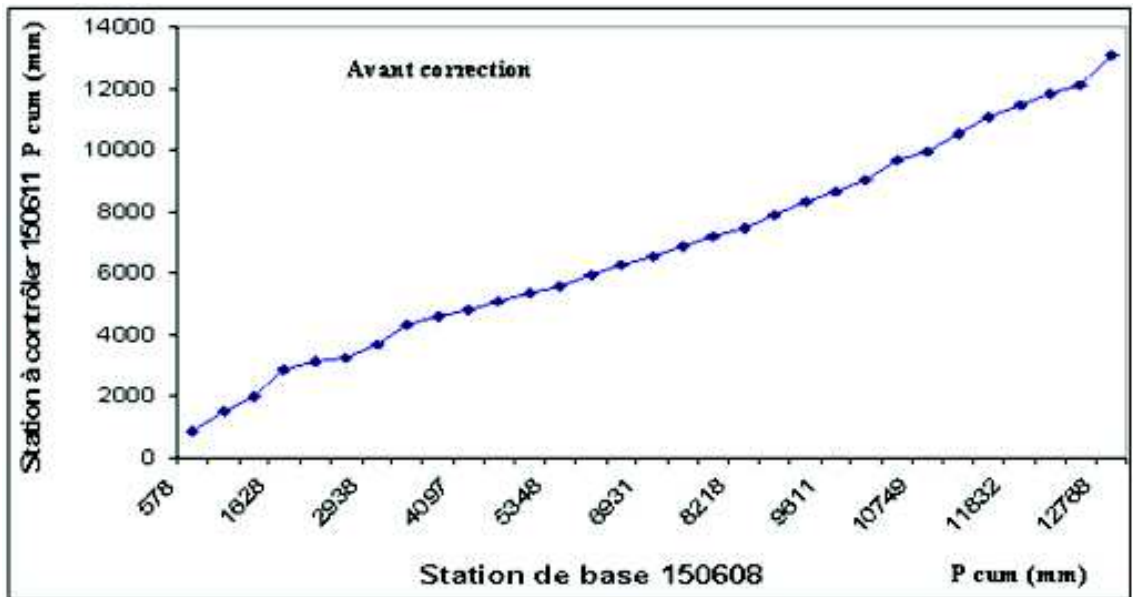


Figure 28 : Application de la méthode des doubles cumuls de la station Mahouane (150611)

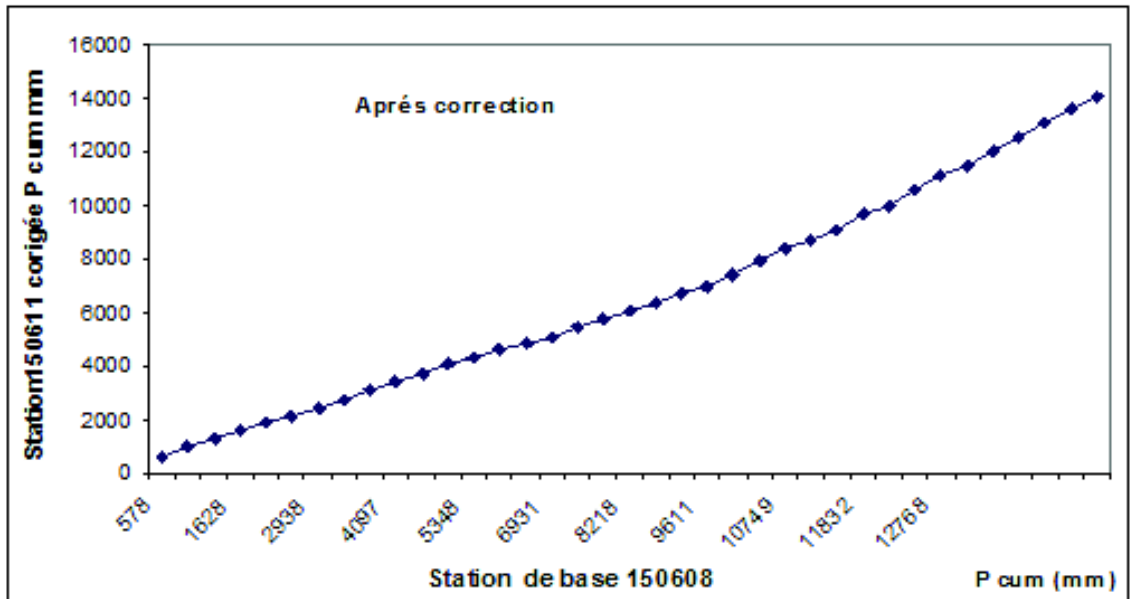


Figure 29 : Correction des données pluviométriques de la station Mahouane (150611)

Grâce au logiciel Hydrolab (Laborde, 1997), nous avons pu obtenir les ellipses de bois des séries douteuses comme illustrée par la figure 30 (cas de la station 150611), voir annexe 1.

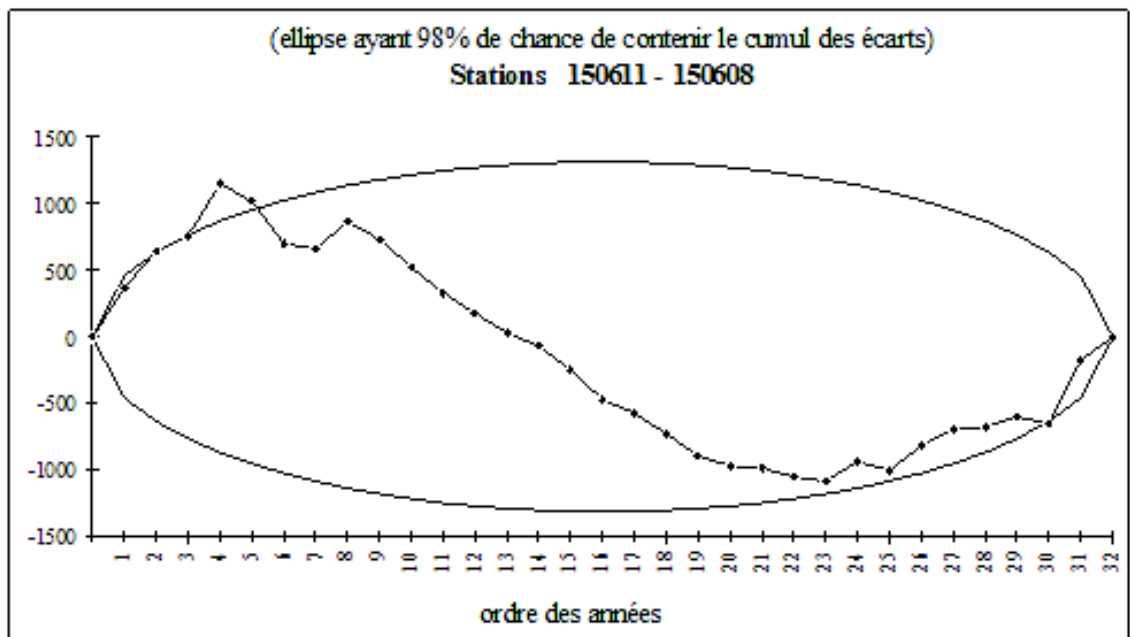


Figure 30 : Evolution du cumul des résidus de régression de la station 150611

Par contre, d'après les graphiques (annexes 2-1 à 2-3), nous remarquons que les séries ne présentent pas d'anomalies. Les valeurs se trouvent à l'intérieur des ellipses, le résultat est en parfaite concordance avec ceux de la méthode de double cumul.

Résultats obtenus et interprétation

L'ANRH (1993) préconise deux modèles de distribution : une normale en régime « méditerranéen », une racine normale en régime sub-tropical.

Des études antérieures concernant l'ajustement des séries pluviométriques de la région (ANRH, 1993) montrent que celles-ci s'ajustent mieux à la loi normale en racine. Celle-ci n'étant rien d'autre qu'un changement de variable de la loi normale.

Effectivement, il nous est apparu; pour notre cas de pluies annuelles du bassin de la Soummam, que la loi racine normale apparaît la plus convenable par rapport à la loi normale car elle permettait de rendre compte de la quasi-totalité des séries les plus longues et les plus fiables.

L'examen graphique (annexes 3-1 à 3-4) montre que se sont les racines carrées des pluies qui s'ajustent le mieux à une loi normale. L'ajustement à une loi racine est le plus adopté pour les pluies annuelles néanmoins il y a des graphes qui s'ajustent à la loi log normale (annexe 4) et deux à la loi normale (annexe 5).

Comblement à partir des analyses en composantes principales

Ainsi, les informations pluviométriques annuelles manquantes ont été reconstituées par le biais de l'ACP. Sur les séries rendues complètes et homogènes, il est devenu possible de calculer pour chaque station la pluie annuelle.

A partir des données relatives aux stations pluviométriques du bassin versant de la Soummam et sa périphérie durant la période de 1968 à 2004 et après comblement des lacunes ; les résultats obtenus sont portés en annexe 7. Ceux-ci nous permettent de tracer les courbes

de variations interannuelles des précipitations dans les trois régions (cf. pages 32 à 34) du bassin versant (régions correspondant aux grands axes hydrographiques du bassin de la Soummam et caractérisées par une bonne liaison pluviométriques c'est-à-dire que les stations ont les meilleures affinités climatiques et qui sont le plus souvent des stations voisines).

La pluviométrie moyenne interannuelle des 35 stations (annexe 7) est de 429 mm, soit un taux de 40 % de stations dont la précipitation est supérieure à la moyenne.

5.2 Les variations des précipitations interannuelles

Les variations des graphiques comme illustrées par les figures 31, 32 et 33 se présentent en dents de scie, nous observons des alternances régulières, des périodes d'années pluvieuses et d'autres sèches.

La majorité des stations (80 %) s'alternent autour de la moyenne arithmétique (429 mm) et la minorité se trouve en dessous du seuil de 200mm. C'est là, en effet, que nous repérons les années hydrologiques les plus sèches.

L'analyse des figures 31, 32 et 33 fait ressortir pour chaque grand sous bassin versant ce qui suit :

Sous bassin Eddous–Sahel (Région 1)

Les années hydrologiques sèches qui se présentent à la station de Ain Nessissa (05 01 01) sont de 1977 à 1993 et de 1996 à 2002 (figure 31). Celle pluvieuse est observée à la station de Souk El Khemis (09 04 02) où la fourchette se situe entre 208 et 888mm avec une moyenne de 506mm, à l'exception des années 1977, 1996, 1999 et 2001 dont la moyenne est de l'ordre de 250mm.

Sous bassin Soummam (Région 2)

Deux stations pluvieuses Aït Aïcha (02 15 09) et Tifra (151007) sont observées durant toute la période d'étude dont les valeurs s'étalent entre 500 et 1694mm. Alors que cinq stations sont en dessous de la valeur moyenne entre 1976 et 1994 (figure 32), A la station 15 04 02, plusieurs valeurs annuelles se trouvent en dessous du seuil de 200mm (années très sèches de 1977 à 1991) et s'alternent entre 31 et 182mm (104mm en moyenne). A partir de 1991, nous observons une sorte de stabilisation qui s'installe.

· Sous bassin Boussellem (Région 3)

Les années sèches de la station de Texter (15 06 14) se présentent en 1980, 1983 et de 1993 à 2004 (figure 33) avec une moyenne de 116mm, les pluies sont comprises entre 78 et 242mm avec une moyenne de 150mm. Les données observées à la station pluvieuse Amouchas (03 02 04), varient entre 294 et 873mm avec une moyenne de 584mm et présentent deux pics en 1986 et 2002 avec une précipitation annuelle de 873 et 1015mm respectivement. A la station pluvieuse de Tizi N'braham (03 02 06), les pluies fluctuent dans la fourchette de 342 et 1119mm avec une moyenne de 731mm.

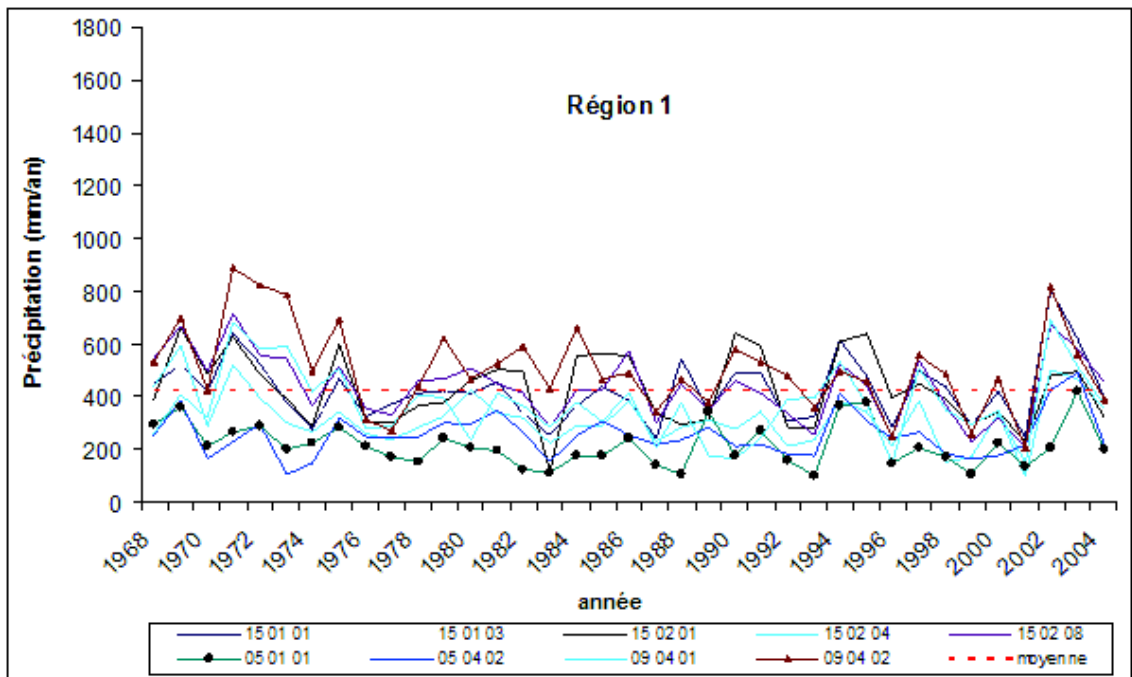


Figure 31 : Courbes de variations interannuelles des précipitations dans la région 1 du bassin versant de la Soummam (1968 - 2004)

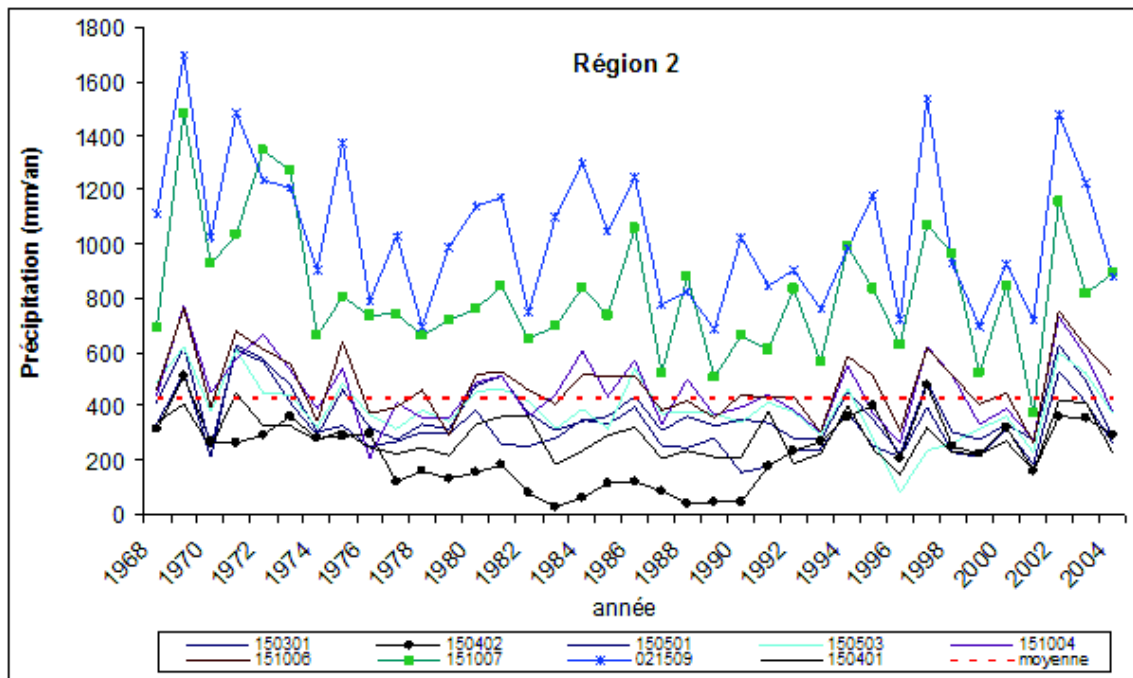


Figure 32 : Courbes de variations interannuelles des précipitations dans la région 2 du bassin versant de la Soummam (1968 - 2004)

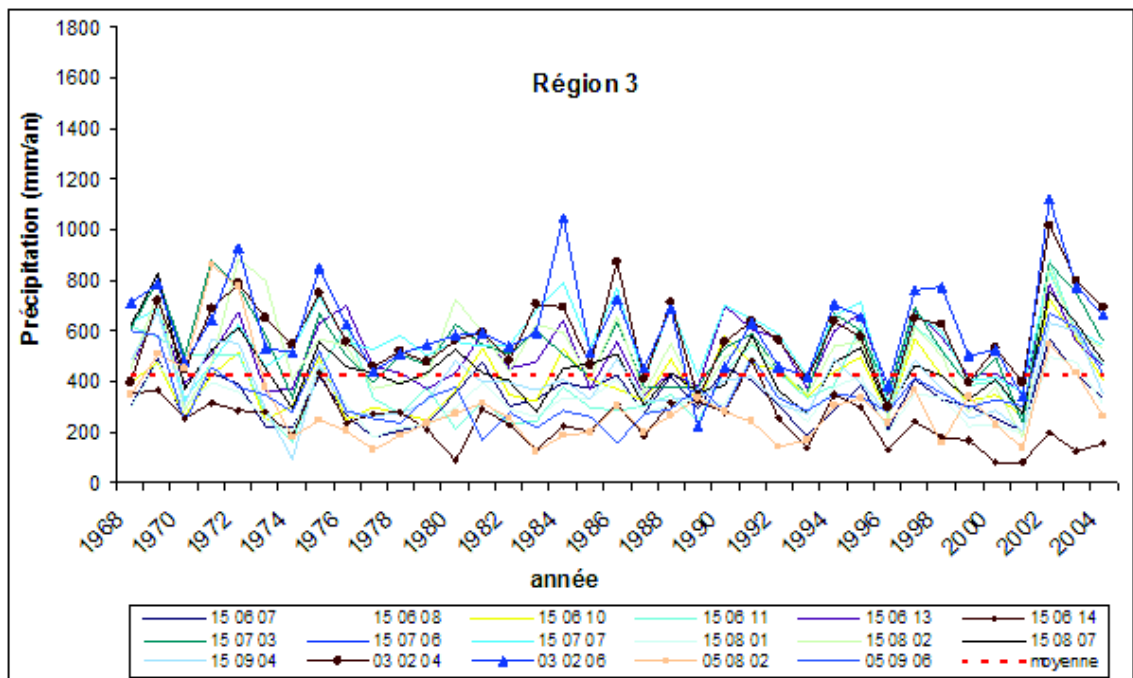


Figure 33 : Courbes de variations interannuelles des précipitations dans la région 3 du bassin versant de la Soummam (1968 - 2004)

5.3 Précipitations mensuelles

Nous avons présenté également sous forme de tableau de valeurs les précipitations moyennes mensuelles durant la période 1968 à 2004 relatives aux 35 stations (annexe 7).

D'après les histogrammes des précipitations moyennes mensuelles (annexes 8.1 à 8.5) dont l'abscisse représente les mois de septembre à août, ces derniers sont chiffrés de 1 à 12, il convient de constater que les diagrammes en échelon présentent une allure identique avec deux saisons : sèche et humide .au cours de l'année hydrologique.

Le passage vers la saison sèche, s'effectue à partir du mois de mai et la reprise de la saison humide se fait au mois d'octobre. Un régime pluvial marqué par un maximum principal en décembre, le minimum est enregistré en juillet au niveau des 35 stations.

L'analyse des données insérées dans le tableau : annexe 7 et également les histogrammes représentés en annexes 8-1 à 8-5, donne un aperçu sur les variations des précipitations dans les régions suivantes :

- Région 1

Année hydrologique de septembre à août très pauvre en précipitations mensuelles dont la quantité reçue est inférieure à 24 et 34mm est remarquée respectivement aux stations de Aïn Nessissa et Dirah Centre (annexes 8-1 à 8-5). L'année pluvieuse, assez riche en précipitations qui va du mois de novembre jusqu'au mois d'avril avec des valeurs de pluies supérieures à 54mm est observée à la station de Souk El Khemis.

- Région 2

Année hydrologique riche en pluviométrie aux stations de Tifra et Aït Aïcha à partir du mois d'octobre (annexes 8-1 à 8-5), dont les précipitations dépassent respectivement les 66 et 80mm jusqu'au mois d'avril ou mai, et le maximum est respectivement de 169 et 178,5mm. Par contre nous constatons une année hydrologique pauvre en précipitations, moins de 32 mm à la station Porte de fer. Une pluie minimale de 0,9 mm est enregistrée à la station de D^{ne} Maouche.

- Région 3

Nous constatons que les stations Amoucha et Tizi N'Braham (annexes 8-1 à 8-5) sont riches en précipitations, les valeurs sont supérieures à 60mm et s'étalent du mois de novembre jusqu'au mois d'avril, ces stations atteignent respectivement un maximum de 103,7 et 100,5mm. Le minimum est enregistré à Tizi N'Braham (2,3mm) et une année hydrologique faible est observée à la station de Tixter limité à 31mm.

5.4 COMBINAISON DES FACTEURS THERMIQUE ET PLUVIOMETRIQUE : LES ZONES BIOCLIMATIQUES

La combinaison des précipitations et des températures caractérise le rythme climatique à dominance « méditerranéenne » régnant à travers la région d'étude : la saison froide et humide s'oppose à la saison chaude et sèche. Nous constatons d'après la figure 34, que les stations pluviométriques situées au Nord sont plus arrosées que celles du Sud, le maximum (143mm) est enregistré à la station de Béjaïa au mois de décembre. Ceci peut être expliqué par l'influence maritime.

Le climat de la zone d'étude est caractérisé généralement par deux saisons : chaude de mai à octobre, mois pendant lesquels les températures mensuelles sont supérieures à la moyenne interannuelle alors que la saison froide nettement plus longue s'étale du mois de novembre à avril. Le maximum est atteint au mois d'août à la station de Bouira (27,8°C).

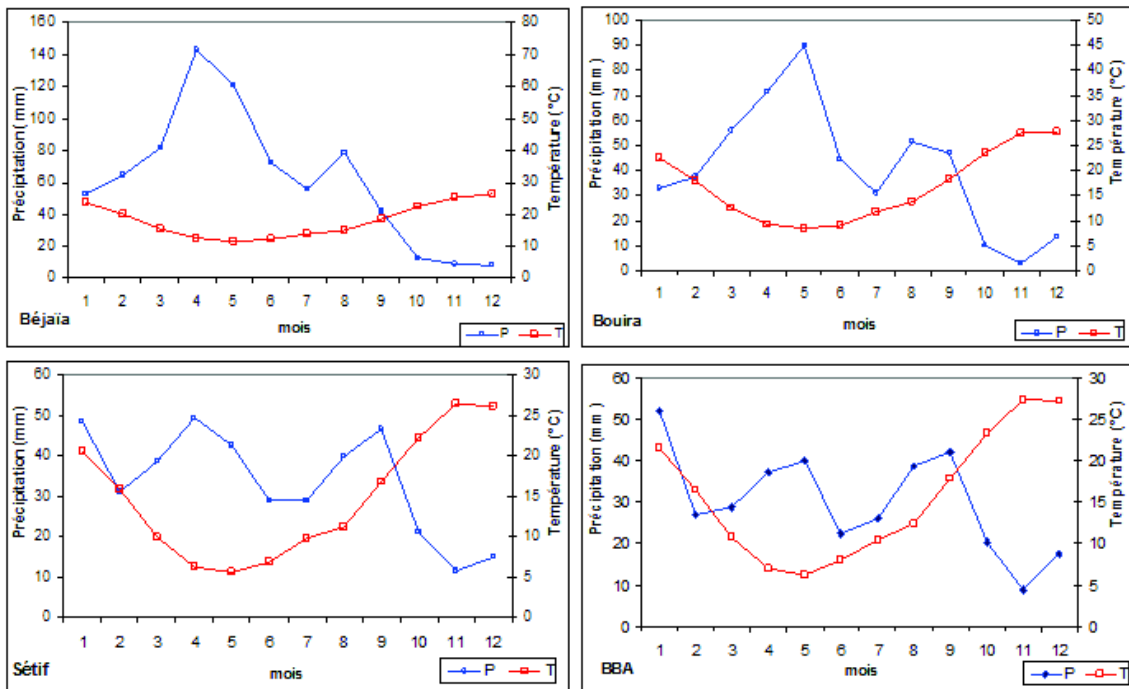


Figure 34 : Régime pluvio-thermique des quatre stations climatologiques de la zone d'étude (données ONM)

En outre, les étages bioclimatiques dans les régions méditerranéennes (figure 35) sont généralement estimés à l'aide du quotient pluviothermique d'Emberger. L'équation s'écrit comme suit :

$$Q_2 = \frac{1000P}{\frac{(M+m)}{2}(M-m)} \quad (1)$$

Avec :

- Q_2 : Quotient pluviothermique d'Emberger ;
- P : Pluviosité moyenne annuelle en mm ;
- M : Moyenne des maxima du mois le plus chaud (juillet) en °C ;
- m : Moyenne des minima du mois le plus froid (janvier) en °C ;
- $M-m$: Amplitude thermique extrême des moyennes en °C ;
- $(M+m)/2$: Températures moyennes en °C.

Le climagramme d'Em

berger comporte la moyenne des minima du mois le plus froid "m" en abscisse et le quotient pluviothermique " Q_2 " en ordonnée.

Pour le bassin versant de la Soummam, la précipitation moyenne arithmétique P est de 429 mm et les températures M et m sont respectivement de 26,6 °C et 4,4 °C. D'après l'équation (1) le quotient pluviothermique " Q_2 " est de 125, ce qui indique un régime subhumide (figure 35).

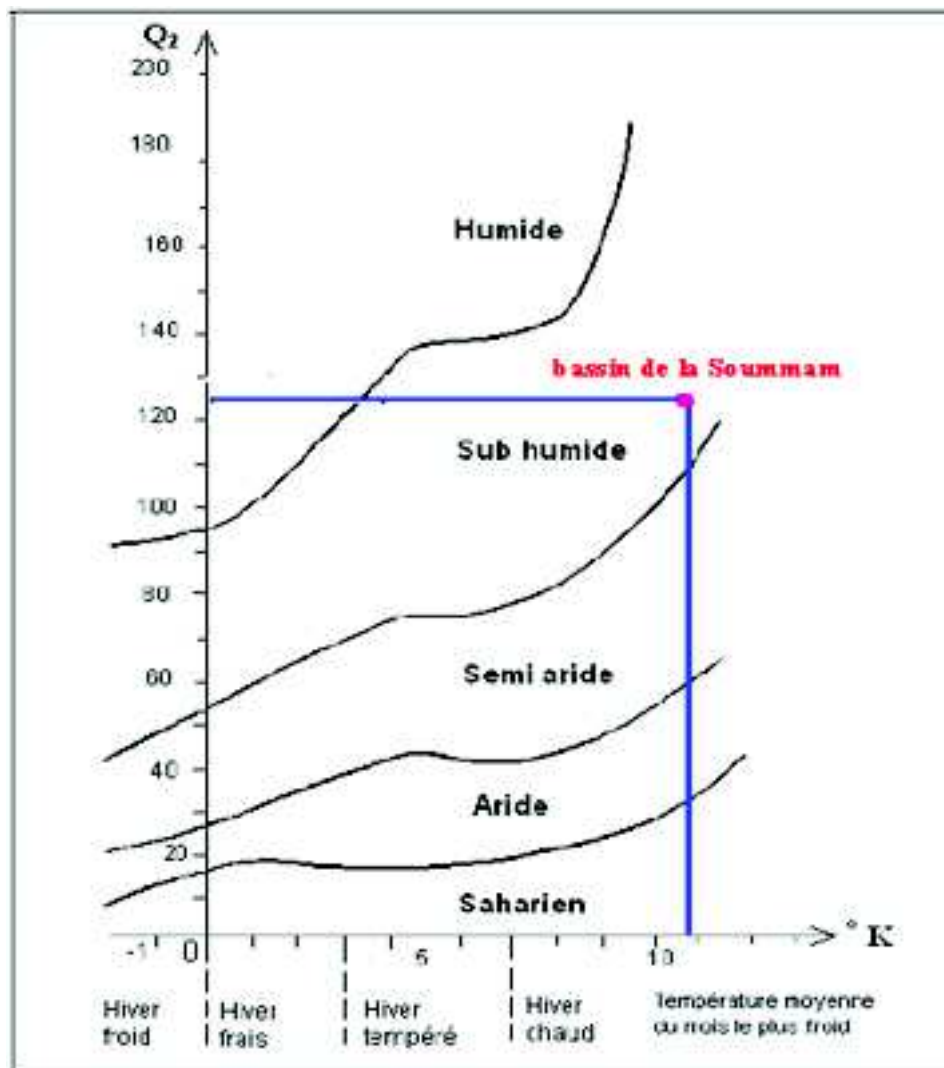


Figure 35 : Climagramme d'Emberger du bassin de la Soummam

CONCLUSION

L'ajustement graphique des séries pluviométriques des différentes stations du bassin de la Soummam pour la période (1968 / 2004) montre que la pluie s'ajuste suivant une loi racine normale de Gauss.

Le comblement des lacunes nous a permis de tracer les courbes de variations interannuelles des précipitations dans le bassin versant de la Soummam et de sa périphérie durant la période de 1968 à 2004.

La pluviométrie moyenne interannuelle obtenue pour les 35 stations est de 429mm, soit un taux de précipitations de 40 % au dessus de cette valeur. La majorité des stations (80 %) s'alternent autour de cette moyenne arithmétique.

Les précipitations sont plus abondantes sur la chaîne de montagne du Durdjura et dans la zone maritime de Béjaïa où elles peuvent atteindre 1.694mm (station de Aït Aïcha en 1969).

En allant vers l'intérieur du bassin, les précipitations les plus faibles varient entre 116 et 250 mm par an et sont enregistrées dans les zones situées au sud, qui sont directement ou indirectement contiguës au bassin du Hodna, caractérisé par un climat aride.

Les diagrammes en échelon des précipitations moyennes mensuelles présentent une allure identique et montrent au cours de l'année hydrologique, la progression du régime des pluies.

A partir du mois de mai, s'effectue le passage vers la saison sèche et la reprise de la saison humide, se fait au mois d'octobre. Un régime pluvial marqué par un maximum principal en décembre et un minimum en juillet au niveau des 35 stations.

Le graphe du régime climagramme d'Emberger montre que la région d'étude est caractérisée par un climat sub humide.

CHAPITRE 6 : BILAN HYDROLOGIQUE

INTRODUCTION

Le mouvement de l'eau dans le sol et le sous-sol est une étape d'un grand circuit sur la Terre, le cycle global de l'eau. La source d'alimentation de l'eau souterraine est l'infiltration qui renouvelle l'eau des réservoirs souterrains et entretient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain (Castany 1998).

De petits changements de température ou de pluviosité sont susceptibles d'entraîner d'importantes répercussions sur le ruissellement des eaux de surface.

Le calcul et l'analyse du bilan hydrologique conduisent, dans ce chapitre, à appréhender les termes essentiels du cycle de l'eau à l'échelle du bassin d'étude : infiltration, ruissellement et déficit d'écoulement.

6.1 DEFICIT D'ECOULEMENT-EVAPOTRANSPIRATION

En raison de la non-disponibilité de certains paramètres, nous nous limitons à l'application de certaines méthodes aux niveaux des stations de l'ONM (Béjaia, Bouira, Sétif et BBA).

6.1.1 Evapotranspiration potentielle (ETP)

Nous allons tenter d'utiliser plusieurs méthodes d'estimation de l'ETP afin de comparer les résultats et de déterminer la plus fiable d'entre-elles.

- Equation de Thornthwaite

L'équation de Thornthwaite est basée sur de nombreuses expériences effectuées sur des cases lysimétriques. L'évaporation potentielle est donnée par la formule :

$$ETP = 16 (10 T / I)^a \quad \text{si } 0 \leq T < 26,5^{\circ}\text{C}$$

Avec :

- ETP: Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm) ;
- T : Température moyenne mensuelle (°C) ;

- I : Somme des indices thermiques i :



où

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

- a : Exposant climatique : $a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 1792 \cdot 10^{-5} \cdot I + 0,49239$
- K : Coefficient d'ajustement.

Les tableaux 25 à 29 résument l'ensemble des résultats de calcul des termes de l'équation de Thornthwaite obtenus aux différentes stations.

Tableau 25 : Les termes I et a aux différentes stations de l'équation de Thornthwaite

Stations	Béjaïa	Bouira	Sétif	BBA
I	85,43	80,37	67,91	73,82
a	1,88	1,78	1,57	1,66

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T (°C)	23,4	19,9	15,3	12,4	11,6	12,0	13,6	14,9	18,3	22,2	25,0	26,3	17,9
ET _p (mm)	106,74	78,39	47,62	32,39	28,26	30,28	38,51	45,67	67,05	96,30	120,43	132,44	824,09
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	109,95	76,04	40,95	27,21	24,59	25,74	39,67	50,24	81,13	117,48	149,34	153,63	895,96

Tableau 26 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Thornthwaite à la station de Béjaïa (1988-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T (°C)	22,5	18,0	12,6	9,3	8,6	9,0	11,7	13,7	18,3	23,5	27,4	27,8	16,9
ET _p (mm)	100,27	67,31	35,66	20,56	18,13	19,57	31,02	41,08	69,16	108,03	142,37	145,79	798,95
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	103,28	65,29	30,67	17,27	15,78	16,64	31,95	45,18	83,69	131,80	176,53	169,11	887,19

Tableau 27 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Thornthwaite à la station de Bouira (1990-2004)

Paramètres	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	année
T (°C)	20,6	15,8	9,9	6,2	5,5	6,8	9,7	11,2	16,8	22,2	26,5	26,2	14,8
ET _p (mm)	91,19	60,46	29,10	14,00	11,62	16,08	28,12	34,94	66,37	102,88	135,33	133,18	723,28
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	93,92	58,65	25,03	11,76	10,11	13,67	28,96	38,44	80,31	125,51	167,81	154,49	808,66

Tableau 28 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Thornthwaite à la station de Sétif (1988-2004)

Paramètres	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	année
T (°C)	21,5	16,5	10,7	6,9	6,3	8,0	10,4	12,4	17,8	23,4	27,5	27,2	15,7
ET _p (mm)	94,36	60,81	29,63	14,30	12,30	18,28	28,26	37,85	68,97	108,60	141,99	139,42	754,78
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	97,19	58,99	25,48	12,01	10,70	15,54	29,11	41,63	83,45	132,50	176,06	161,73	844,4

Tableau 29 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Thornthwaite à la station de BBA (1988-2004)

Les valeurs de l'ETP moyennes annuelles déterminées par la méthode de Thornthwaite sont assez proches et varient entre 895,96mm et 808,66mm aux différentes stations.

Formule de Serra

$$ETP = 16 (10 T / I)^a$$

T : Température moyenne mensuelle (mm);

I: Somme des indices thermiques i



Où

$$i = 0,09 T^{3/2}$$

a : Exposant climatique :

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

K : Coefficient d'ajustement.

Les tableaux 30 à 34 résument l'ensemble des résultats de calcul des termes de l'équation de la formule de Serra obtenus aux différentes stations.

Tableau 30 : Les termes I et a aux différentes stations de la formule de Serra

Stations	Béjaïa	Bouira	Sétif	BBA
I	84,35	79,33	67,09	72,89
a	1,85	1,77	1,57	1,67

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T (°C)	23,4	19,9	15,3	12,4	11,6	12,0	13,6	14,9	18,3	22,2	25,0	26,3	17,9
ET _p (mm)	106,03	78,25	47,91	32,79	28,68	30,69	38,88	45,98	67,09	95,81	119,39	131,10	822,59
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	109,21	75,90	41,20	27,54	24,95	26,08	40,05	50,58	81,18	116,88	148,05	152,07	893,70

Tableau 31 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Serra à la station de Béjaïa (1988-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T (°C)	22,5	18,0	12,6	9,3	8,6	9,0	11,7	13,7	18,3	23,5	27,4	27,8	16,9
ET _p (mm)	101,55	68,33	36,33	21,01	18,54	20,00	31,63	41,81	70,19	109,37	143,91	147,35	810,03
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	104,60	66,28	31,24	17,65	16,13	17,00	32,58	45,99	84,94	133,43	178,45	170,92	899,21

Tableau 32 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Serra à la station de Bouira (1990-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T (°C)	20,6	15,8	9,9	6,2	5,5	6,8	9,7	11,2	16,8	22,2	26,5	26,2	14,8
ET _p (mm)	92,94	61,63	29,66	14,27	11,84	16,39	28,66	35,62	67,65	104,86	137,94	135,75	737,20
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	95,73	59,78	25,51	11,99	10,30	13,93	29,52	39,18	81,85	127,93	171,05	157,47	824,23

Tableau 33 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Serra à la station de Sétif (1988-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T (°C)	21,5	16,5	10,7	6,9	6,3	8,0	10,4	12,4	17,8	23,4	27,5	27,2	15,7
ET _p (mm)	87,43	57,70	29,23	14,68	12,73	18,52	27,96	36,85	65,00	99,86	128,67	126,47	705,09
K	1,03	0,97	0,86	0,84	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
ETP (mm)	90,05	55,97	25,14	12,33	11,07	15,74	28,79	40,53	78,65	121,83	159,55	146,71	786,37

Tableau 34 : Evapotranspirations potentielles moyennes mensuelles et annuelles calculées par la méthode de Serra à la station de BBA (1988-2004)

Les valeurs de l'ETP moyennes annuelles calculées par la méthode de Serra varient entre 899,21 et 786,37mm aux différentes stations. Nous remarquons que les résultats sont évidemment proches que ceux de la formule de Thornthwaite.

Formule de Turc (1961)

Suite à ses expériences faites sur des cuves lysimétriques à Versailles, Rothamsted et Groningen, Turc a publié une gamme de formules permettant le calcul de l'ETP. En 1962, il ajouta à sa formule de calcul de l'ETR, le bilan radiatif et introduisit l'humidité relative. En gardant la simplicité et la disponibilité des données météorologiques, la formule de Turc s'écrit ainsi (Gouaidia, 2008) :

$$ETP = KC \left[\frac{T}{T + 15} \right] (I_g + 50)$$

Avec :

- K un coefficient égal à 1 si l'humidité relative H_r est supérieure à 50 % ;
- $C = 0,013 * 30 \text{ jours} = 0,4$;
- R_s ou I_g : rayonnement solaire global [$\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$].

Nous utilisons la formule d'Angstrom, elle s'écrit comme suit :

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

Avec :

- R_s : Rayonnement solaire ou rayonnement à onde courte [$\text{MJ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$] ;
- N : Durée astronomique possible d'insolation [heure] ;
- n : Durée d'insolation effective [heure] ;
- n/N : Durée de l'insolation relative [-] ;
- R_a : Rayonnement extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ j}^{-1}$] ;
- A_s : Constante de régression, exprimant la fraction de la radiation extraterrestre qui atteint la surface de la Terre en jour couvert ($n = 0$) ;
- $a_s + b_s$: Fraction du rayonnement extraterrestre qui atteint la surface de la Terre en jour dégagé ($n = N$) .

L'évaporation équivalente qui correspond en mm.j^{-1} est obtenue en multipliant la valeur de R_s par 0.408. Les valeurs d'Angstrom (a_s) et (b_s) varient en fonction des conditions atmosphériques (humidité et poussière), mais également de la latitude et du mois. En outre, lorsque les données du rayonnement solaire ne sont pas valables, les valeurs de (a_s) et (b_s) sont données :

- $a_s = 0.25$ et $b_s = 0.50$
- la latitude de la station de Béjaïa est de $36^\circ 43'$
 $36 + (43/60) = 36.72^\circ$
- $(\pi / 180) 36.72 = +0.641 \text{ rad}$
- $1 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1} = 0.408 \text{ mm.d}^{-1}$
- $1 \text{ cal.cm}^{-2}.\text{jour}^{-1} = 4.1868. 10^{-2} \text{ M.J.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$

Le tableau 35, présente les résultats de l'ETP au niveau de la station de Béjaïa.

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
T	23,4	19,9	15,3	12,4	11,6	12,0	13,6	14,9	18,3	22,2	25,0	26,3	17,9
Ra (MJm ⁻² day ⁻¹)	31,2	24,3	18,3	15,6	17,1	22,2	28,7	35,5	40	41,7	40,8	37,3	/
N (hours day ⁻¹)	12,2	11,1	10	9,5	9,7	10,7	11,7	12,9	14	14,5	14,3	13,4	/
n (heure)	236,2	203	163,2	147	153,7	158,4	195,2	212,8	255,1	285,4	324,6	303	/
n (heure/28,30,31j)	7,87	6,55	5,44	4,74	4,96	5,66	6,3	7,09	8,23	9,51	10,47	9,79	/
Rs (MJm ⁻² j ⁻¹)	17,86	13,24	9,55	7,79	8,65	11,42	14,90	18,63	21,76	24,10	25,14	22,95	/
Rs (mm j ⁻¹)	7,29	5,40	3,90	3,18	3,53	4,66	6,08	7,60	8,88	9,83	10,26	9,36	/
Rs (cal.cm ⁻² .jour ⁻¹)	426,6	316,2	228,1	186,1	206,6	272,8	355,9	445,0	519,7	575,6	600,5	548,2	/
ETP (mm.mois ⁻¹)	116,3	83,5	56,1	42,8	44,7	57,4	77,3	98,7	125,3	149,3	162,6	152,3	1166,3

Tableau 35 : Evapotranspirations de référence mensuelles de 1988-2004 à la station de Béjaïa selon la méthode de Turc

L'application numérique de la formule de Turc à la station de Béjaïa durant la période de 1988 à 2004, donne une valeur annuelle de l'ETPégale à 1166,3mm.

- Formule de Penman-Monteith

Les méthodes analytiques ou à base physique sont les plus conseillées et les plus utilisées pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence, basées sur le modèle de Penman-Monteith.

Les valeurs mensuelles interannuelles de l'ETP (ONM, 2006) aux différentes stations selon la méthode de FAO Penman-Monteith sont indiquées dans l'annexe 9-2.

Interprétation des graphes

La disponibilité des données météorologiques conditionnera le choix d'une formulation au détriment d'une autre ainsi que ses possibilités d'application pour la région d'étude concernée.

Afin de comparer la précision des différentes relations de calcul, la figure 36 illustre les quantités mensuelles évapotranspirées déterminées par la relation de Penman-Monteith, Thornthwaite, Serra, et Turc.

Les graphiques de ces figures mettent bien en évidence, la similitude des valeurs de l'ETP moyennes mensuelles obtenues par les formules de Serra et Thornthwaite aux différentes stations.

Nous remarquons que l'évolution mensuelles de l'ETP varie uniformément aux différentes méthodes et période. Nous pouvons distinguer que les valeurs augmentent en été (le maximum est enregistré en juillet) pour décroître en hiver.

6.1.2 Déficit d'écoulement ou évapotranspiration réelle (ETR)

Nous déterminons l'ETR à l'aide de trois méthodes : la formule de Turc, formule de Coutagne et le bilan hydrique de Thornthwaite.

- Formule de Turc (1949)

Turc a proposé une relation entre le déficit hydrique, la pluie annuelle moyenne et la température annuelle moyenne. Il préconise pour une humidité relative moyenne supérieure à 50 % (cas habituel des régions tempérées), la formule suivante :

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

Et

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

Avec :

- ETR: Evapotranspiration réelle annuelle (mm) ;
- P: Lamme d'eau précipitée moyenne annuelle (mm) ;
- L: Paramètre fonction de la température ;
- T: Température moyenne annuelle (en °C).

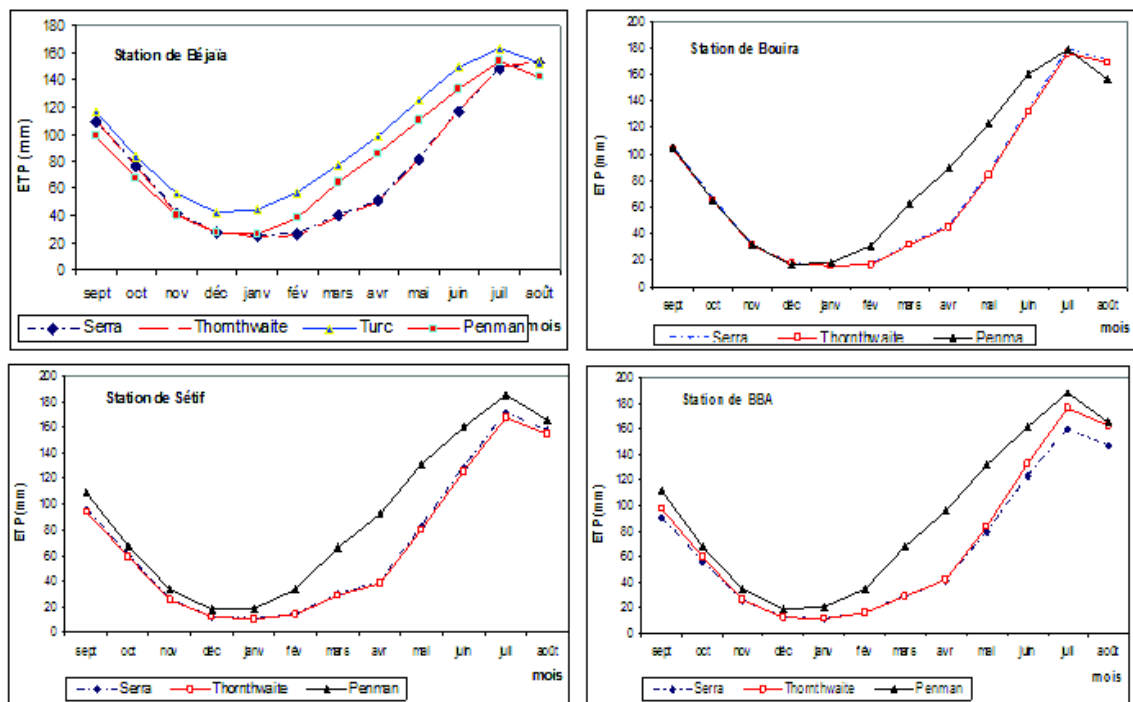


Figure 36 : Variation de l'évapotranspiration mensuelle déterminée aux différentes stations selon différentes méthodes

Les résultats obtenus de l'ETR aux différentes stations sont consignés dans le tableau 36.

Tableau 36 : Evapotranspirations réelles moyennes annuelles calculées par la méthode de Turc (1949) aux différentes stations

Paramètres	Stations			
	Béjaïa	Bouira	Sétif	BBA
T (°C)	17,9	16,9	14,8	15,7
L	1035	961	832	886
P	738	489	402	361
ETR	621,86	454,54	377,68	349,64

L'application numérique de la formule de Turc donne une valeur de l'ETRde 621,86mm, soit 84 % des précipitations au niveau de la station de Béjaïa et ce avec une température moyenne annuelle de l'ordre de 17,9°C.

L'ETR calculée aux stations de Bouira, Sétif et BBA sont respectivement de 93 %, 94% et 97 % par rapport aux précipitations enregistrées.

· Formule de Coutagne

Le déficit d'écoulement exprimé au pas de temps annuel, se déduit de la pluie annuelle et de la température par la formule suivante :

$$ETR = P - \lambda P^2$$

avec

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14T}$$

Où :

P: Précipitation moyenne annuelle (m) ;

T: Température moyenne annuelle (°C).

La formule de Coutagne ne peut être appliquée que si la condition suivante est satisfaite.

$$1 / (8 \lambda) < P < 1 / (2 \lambda)$$

Nous avons résumé également sous forme de tableau les valeurs de l'ETR obtenues par l'application numérique de la formule de Coutagne (tableau 37).

Tableau 37 : Les termes de la formule de Coutagne aux différentes stations

Stations	Paramètres			
	P	λ	$P - \lambda P^2$	ETR
Béjaïa	0,738	0,30	0,5746	574,60
Bouira	0,489	0,32	0,4125	412,48
Sétif	0,402	0,35	0,3454	345,44

Alors dans le cas où $P < 1 / (8 \lambda)$, le déficit d'écoulement est égal aux précipitations moyennes annuelles et le terme d'écoulement est nul.

Cette condition correspond aux données de la station de BBA où : $ETR = P = 361 \text{ mm}$.

Nous concluons d'après les résultats, que les valeurs de l'ETR sont de 78%, 84% et 86% des précipitations enregistrées respectivement aux stations de Béjaïa, Bouira et Sétif.

Méthode du bilan de Thornthwaite

Méthode de calcul

L'étude pédologique de la vallée de la Soummam élaborée par l'ANRH avait révélée l'existence de sept (7) classes de sol, selon la classification CPCS (Commission de pédologie et de cartographie des sols).

La classe la plus répandue est celle de sols peu évolués d'apport alluvial modaux et hydromorphes. Ces derniers sont soumis à une présence d'eau permanente plus ou moins longue dans leur profil et de surcroît d'une grande extension dans toute la vallée, la raison pour laquelle nous fixons la valeur du RFU à 100mm.

Pour le calcul de l'ETR, nous avons retenu les résultats de l'ETPissus de l'application de la formule de Penman-Monteith (ONM).

Les tableaux 38 à 41 résument l'ensemble des résultats de calcul de l'ETR obtenus aux différentes stations.

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
ETP	98,4	67,5	39,7	27,9	26,7	38,5	64,4	85,3	109,7	133,8	153,0	142,0	986,8
P	52	64	82	143	121	72	56	78	42	12	9	8	738
P-ETP	-46,4	-3,5	42,3	115,1	94,3	33,5	-8,4	-7,3	-67,7	-121,8	-144,0	-134,0	/
RFU	0	0	42,3	100	100	100	91,6	84,3	16,6	0	0	0	/
ETR	52	64	39,7	27,9	26,7	38,5	64,4	85,3	109,7	28,6	9	8	554
Déficit	46,4	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	105,2	144,0	134,0	433,1
I	0	0	0	57,4	94,3	33,5	0	0	0	0	0	0	185,20

Tableau 38 : Evapotranspiration réelle par la méthode du bilan de Thornthwaite à la station de Béjaïa (1988-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
ETP	105,7	65,9	31,8	17,0	18,8	30,6	62,9	89,7	123,1	160,4	178,5	156,9	1041,5
P	33	38	56	72	90	45	31	52	47	10	3	14	489
P-ETP	-72,7	-27,9	24,2	55,0	71,2	14,4	-31,9	-37,7	-76,1	-150,4	-175,5	-142,9	/
RFU	0	0	24,2	79,2	100	100	68,1	30,4	0	0	0	0	/
ETR	33	38	31,8	17,0	18,8	30,6	62,9	89,7	77,4	10	3	14	426
Déficit	72,7	27,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,7	150,4	175,5	142,9	615,10
I	0	0	0	0	50,4	14,4	0	0	0	0	0	0	64,80

Tableau 39 : Evapotranspiration réelle par la méthode du bilan de Thornthwaite à la station de Bouira (1990-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
ETP	108,9	67,0	33,2	18,1	18,9	33,7	65,8	92,0	131,3	160,4	185,4	165,9	1080,7
P	49	31	39	49	43	29	29	40	47	21	12	15	402
P-ETP	-59,9	-36,0	5,8	30,9	24,1	-4,7	-36,8	-52,0	-84,3	-139,4	-173,4	-150,9	/
RFU	0	0	5,8	36,7	60,8	56,1	19,3	0	0	0	0	0	/
ETR	49	31	33,2	18,1	18,9	33,7	65,8	59,3	47	21	12	15	403
Déficit	59,9	36,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,7	84,3	139,4	173,4	150,9	484,8
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 40 : Evapotranspiration réelle par la méthode du bilan de Thornthwaite à la station de Sétif (1988-2004)

Paramètres	Mois												année
	sept.	oct.	nov.	déc.	janv.	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	
ETP	110,8	67,6	34,2	18,1	20,5	34,3	67,6	95,3	131,9	161,4	187,7	165,3	1094,6
P	52	27	29	37	40	22	26	39	42	20	9	18	361
P-ETP	-58,8	-40,6	-5,2	18,9	19,5	-12,3	-41,6	-56,3	-89,9	-141,4	-178,7	-147,3	/
RFU	0	0	0	18,9	38,4	26,1	0	0	0	0	0	0	/
ETR	52	27	29	18,1	20,5	34,3	52,1	39	42	20	9	18	361
Déficit	58,8	40,6	5,2	0,0	0,0	0,0	15,5	56,3	89,9	141,4	178,7	147,3	733,7
I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 41 : Evapotranspiration réelle par la méthode du bilan de Thornthwaite à la station de BBA (1988-2004)

L'examen des tableaux 38 à 41 permet de conclure que la reconstitution de la réserve du sol commence en novembre à l'exception de la station de BBA (décembre), puis atteint son maximum (100 mm) durant la période allant de décembre à Béjaïa (de janvier à Bouira) jusqu'au mois de février, durée au cours de laquelle il y aura un excédent qui se traduira par un écoulement.

A partir du mois suivant les précipitations ne satisferont plus l'évapotranspiration et c'est le début de l'épuisement de la réserve qui se poursuivra jusqu'à la vider.

Au niveau des stations de Sétif et BBA durant cette période hivernale, nous assistons à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU en janvier mais sans atteindre son maximum.

En général à partir du mois de juin à Béjaïa, mai à Bouira et avril à Sétif, un déficit agricole s'observe jusqu'au mois d'octobre, et de mars à novembre à BBA.

Interprétation des graphes

Il en ressort pour chaque station (figure 37) une année hydrologique moyenne humide avec deux périodes :

- une période humide avec P supérieure à ETR au niveau des stations, elle est de :

- octobre à mars (Béjaïa) ;
- mi octobre à mi février (Bouira) ;
- novembre à février (Sétif) ;
- novembre à mi mars (BBA).

- une période sèche avec P inférieure à ETR, le déficit agricole observé au niveau des stations est entre :

- avril et septembre (Béjaïa) ;
- mi février et mi octobre (Bouira) ;
- mars et octobre (Sétif) ;
- mi mars et octobre (BBA).

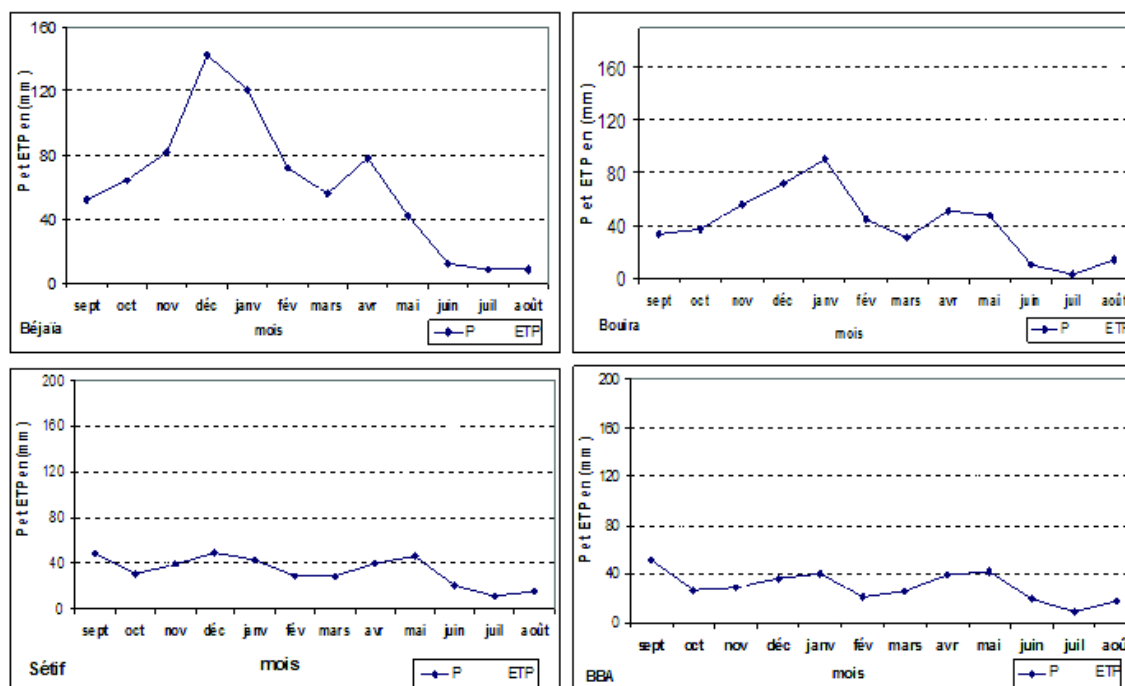


Figure 37 : Évolution annuelle du bilan hydrique d'après Thornthwaite aux différentes stations

Le tableau 42 résume l'ensemble des résultats de calcul obtenus par les différentes méthodes afin de pouvoir les comparer.

Tableau 42 : Tableau récapitulatif des valeurs des ETP et ETRobtenues par différentes méthodes de calcul au niveau des quatre stations

Paramètres	Méthodes	Stations							
		Béjaïa		Bouira		Sétif		BBA	
		mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
ETP	THORNTHWAITE SERRA	1094,60	786,37	1094,60	786,37	1094,60	786,37	1094,60	786,37
ETR	TURC	621,86	45,78	554,54	40,61	487,78	35,44	309,64	22,71
	COUTAGNE B.	621,86	45,78	554,54	40,61	487,78	35,44	309,64	22,71
	THORNTHWAITE	1094,60	786,37	1094,60	786,37	1094,60	786,37	1094,60	786,37

Il est utile de comparer les résultats obtenus par les différentes méthodes utilisées, afin de connaître celle qui s'adapte le mieux à la région.

Nous constatons que les méthodes de Serra et Thornthwaite donnent évidemment les mêmes résultats. Par ailleurs, l'ETPselon la formule de Penman-Monteith enregistre un écart de l'ordre de 93 à 308 mm par rapport à la méthode de Serra et aux différentes stations (figure 38). La valeur maximale est enregistrée à la station de Béjaïa par la formule de Turc.

Nous constatons d'après les résultats de l'ETR auxquels nous avons aboutis qu'ils sont relativement égaux. La consommation en pourcentage des pluies est élevée, ceci induit un faible excédent et par conséquent la recharge de la nappe est très limitée.

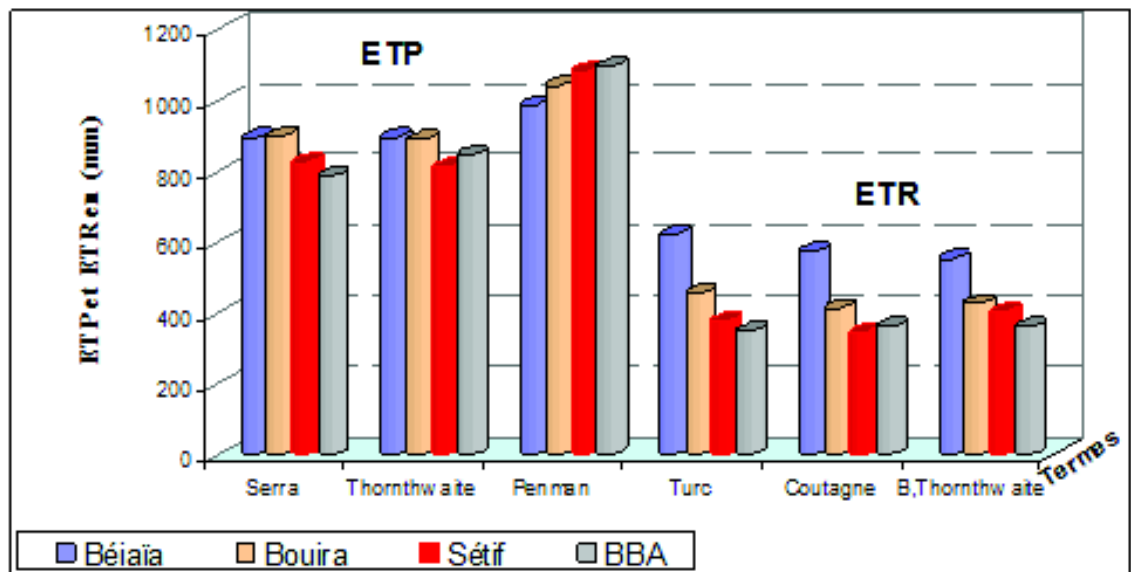


Figure 38 : Evapotranspiration potentielle et réelle moyenne annuelle selon différentes méthodes

Pour ce qui est de la suite des calculs des différents termes de l'équation du bilan, nous jugeons utile de retenir les valeurs de l'ETR issues de la même méthode pour les quatre stations pluviométriques, en l'occurrence celle de Thornthwaite, qui est universellement appliquée pour le calcul des bilans hydrologiques.

6.2 HYDROLOGIE DE SURFACE

Les cours d'eau localisés en amont du système sont: Eddous, Ziane, Sahel, Azerou, et Boussellem. Cependant à l'aval, nous trouvons : Ighzer Amokrane, Seddouk, Imoula, Roumila,

Amizour, Amassine, El Kseur et Oued Ghir. Le réseau hydrométrique dans le bassin de la Soummam est constitué de 26 stations. Parmi elles, 10 sont primaires (figure 39) et 16 sont secondaires.

La densité des stations de jaugeage n'est passuffisante pour procéder à une bonne évaluation des ressources en eau. Le nombre d'années d'observation est aussi un paramètre déterminant.

En général, il faut environ 20 à 30 années d'observations pour avoir une bonne évaluation des écoulements au niveau d'une station hydrométrique, mais avec la mise en évidence, à travers les études qui ont été faites sur la pluviométrie, de longues séquences de sécheresse allant jusqu'à 25 années, cette période devient insuffisante.

6.2.1 Caractéristiques des stations hydrométriques

L'évaluation du débit est basée sur les données fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques et concerne les débits moyens mensuels, annuels et interannuels se rapportant à quelques années d'observations.

Les caractéristiques et les débits moyens interannuels pour la période d'enregistrement de chaque station à l'intérieur du bassin versant de la Soummam sont indiqués dans le tableau 43.

Station	Code	Coordonnées Lambert		Nom de l'oued	Superficie (km ²)	Période d'observation	Apport Interannuel (Hm ³)
		X (km)	Y (km)				
Tilesdit	15 01 06	626,38	340,58	Eddous	842	64 - 86	107
Ain Testa	15 01 14	591,4	329,6	Lekhal	190	73 - 93	10,2
El Asnam	15 02 04	620,4	335,5	Ziane	800	67 - 93	16,4
Porte de Fer	15 04 01	650,7	342	Azerou	605	68 - 93	102
Fematou	15 06 01	742,02	329,4	Boussellem	105	69 - 95	12,5
Ain Zada	15 07 01	742,02	329,4	Boussellem	105	71 - 82	15,95
Magraoua	15 07 02	713,15	333,1	Boussellem	2350	68 - 94	13,5
Boubirek	15 07 03	689,6	354,5	Boussellem	2950	70 - 93	123,8
Sidi Yahia	15 09 01	670,4	347,1	Boussellem	4050	71 - 95	165,4
Sidi Aïch	15 10 01	678,2	369,65	Soummam	84,2	53 - 90	465,1

Tableau 43 : Caractéristiques et débits moyens interannuels des stations primaires hydrométriques

ANRH (2003)

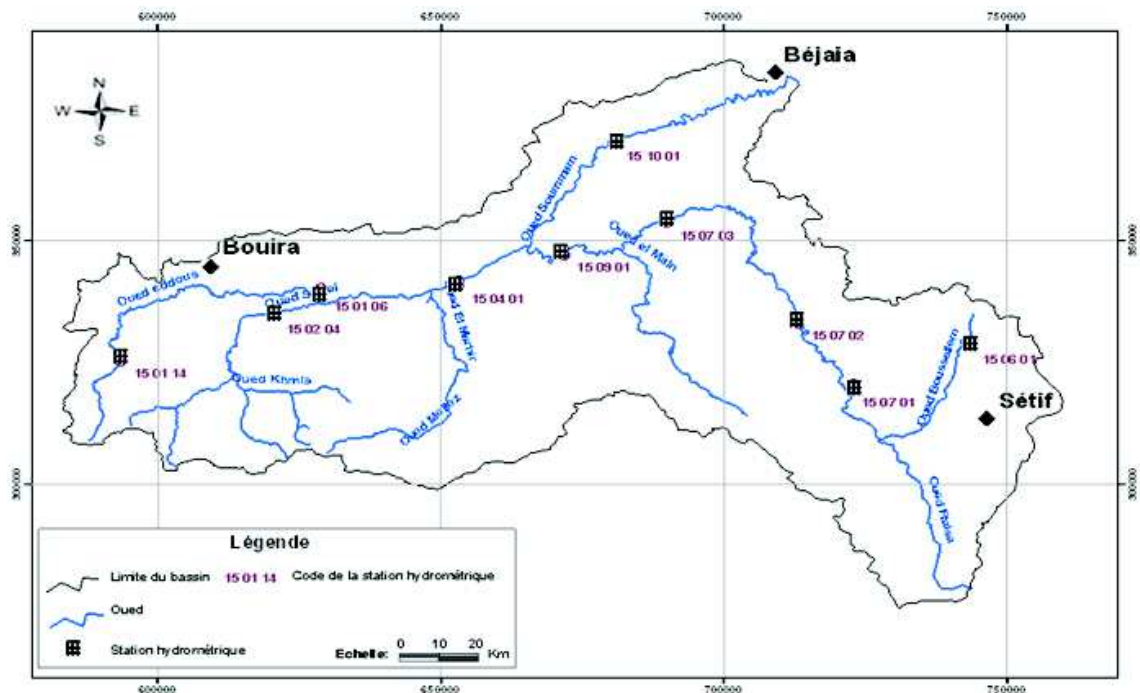


figure 39 : Localisation des stations hydrométriques

6.2.2 Les bassins jaugés et leurs données hydrométriques

La sélection définitive des stations hydrométriques est effectuée en tenant compte de l'état d'homogénéité et de la qualité des séries d'observations disponibles sur une période commune (1968-1996).

La mise en forme et l'homogénéisation des séries passent par un travail long et fastidieux eu égard à la nature et à la variété des bases de données informatisées de l'ANRH. Les résultats de l'analyse statistique des sept stations retenues pour l'étude sont consignés dans le tableau 44.

Années	Stations						
	Tilesdit 150106	Fermatou 15 06 01	Ain Zada 15 07 01	Magraoua 15 07 02	Boubirek 150703	SidiYahia 15 09 01	Sidi Aïch 15 10 01
1968	2,30	0,31	0,35	0,82	3,17	4,34	14,65
1969	6,68	0,63	1,15	3,68	9,39	13,62	50,73
1970	1,61	0,18	0,24	0,63	2,48	3,23	13,59
1971	11,05	0,44	0,73	2,19	6,67	9,38	42,77
1972	8,55	0,83	1,05	3,04	9,25	14,47	44,98
1973	5,81	0,49	0,48	1,56	5,52	8,78	30,06
1974	1,81	0,15	0,24	0,63	2,65	3,02	10,14
1975	3,31	0,38	0,64	1,86	5,17	7,82	21,40
1976	1,74	0,26	0,47	0,87	3,20	4,19	12,71
1977	1,12	0,12	0,10	0,33	1,66	2,26	8,37
1978	2,39	0,16	0,16	0,63	2,35	2,99	9,81
1979	3,10	0,10	0,31	0,60	1,91	2,49	10,70
1980	3,43	0,20	0,23	0,63	3,87	5,02	16,32
1981	3,85	0,66	1,19	3,03	7,22	9,24	14,98
1982	2,60	0,26	0,52	1,55	5,48	5,58	18,28
1983	1,28	0,82	1,16	2,14	5,27	6,05	12,43
1984	3,23	1,20	1,62	3,49	8,56	11,79	16,65
1985	2,01	0,15	0,23	0,31	3,28	2,72	9,46
1986	0,00	0,99	0,78	0,88	6,12	9,85	22,47
1987	0,39	0,06	0,08	0,07	1,17	1,34	4,09
1988	0,00	0,61	0,22	0,32	0,26	3,61	12,17
1989	0,56	0,06	0,08	0,27	0,26	1,14	3,39
1990	0,00	0,46	0,32	0,30	2,59	2,61	8,53
1991	1,71	0,31	0,13	0,34	2,08	2,81	17,23
1992	1,38	0,46	0,34	0,57	3,17	4,50	16,47
1993	0,70	0,11	0,09	0,12	1,31	1,15	5,40
1994	3,07	0,40	0,38	0,92	3,83	5,88	21,81
1995	1,31	0,36	0,33	0,63	2,76	3,68	12,55
1996	0,76	0,06	0,05	0,06	1,05	0,91	4,81

Tableau 44 : Apports liquides en m³/s au niveau du réseau hydrographique de la Soummam période (1968-1996)

En se basant sur les données illustrées dans le tableau 44, nous avons réalisé les courbes d'évolution des débits d'écoulement au niveau des sept stations de mesure durant la période 1968 à 1996.

L'interprétation des dites courbes (figure 40) montre une variation des débits en dents de scie. Les fortes valeurs sont enregistrées à la station de Sidi Aïch avec un maximum de 50,73 m³/s en 1969 et un minimum de 3,39 m³/s en 1989. Les basses eaux sont enregistrées au niveau des stations de Fermatou et Ain Zada.

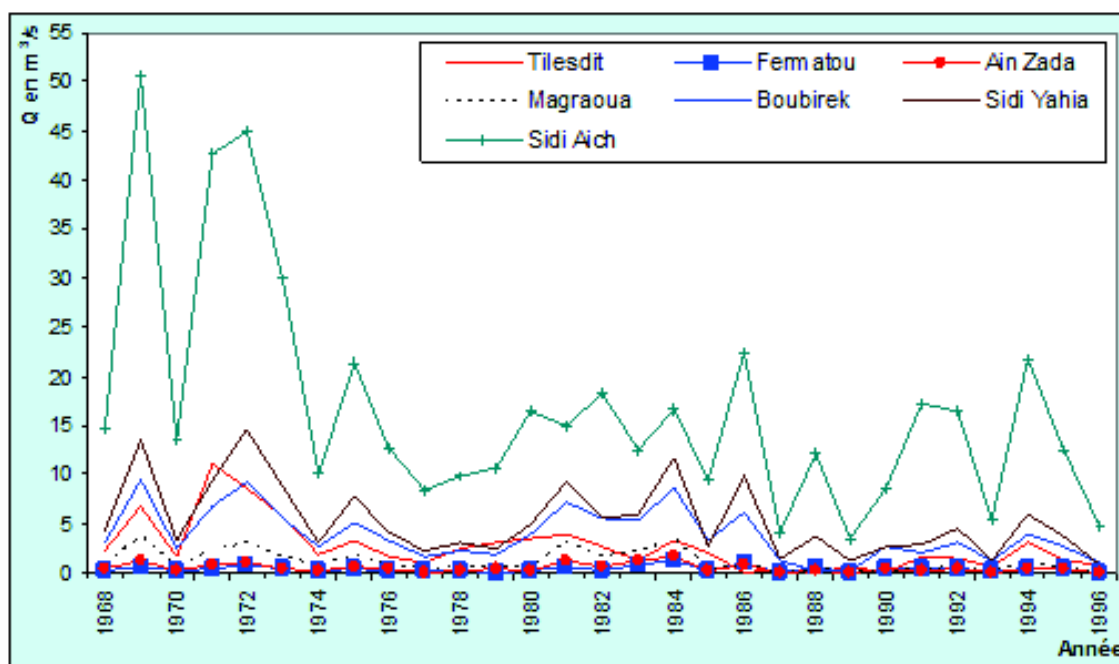


Figure 40 : Evolution des débits moyens interannuels des sept stations pour la période 1968-1996

Les potentialités en eau superficielle illustrées dans le tableau 6 (page 46) et l'évaluation des débits faite ci-après ne donnent qu'un ordre de grandeur de l'écoulement superficiel à l'échelle du bassin.

Il est important de préciser que le débit d'écoulement à la station de Sidi Aïch (151001) ne tient pas en compte :

- les volumes d'eau annuellement utilisés pour l'irrigation le long du cours inférieur de la basse Soummam ;
- l'aire additionnelle de drainage entre Sidi Aïch et l'embouchure de l'Oued Soummam.
- l'Oued Eddous à Tilesdit

La station de Tilesdit est située près de l'exutoire du sous-bassin de l'Oued Eddous.

Il en ressort que l'écoulement à Tilesdit ne semblerait pas pouvoir excéder les 36 % de celui de Sidi Aïch. Pour cette dernière station, l'écoulement moyen interannuel est de $465,1 \text{ hm}^3$. Par conséquent, l'écoulement annuel moyen à Tilesdit devrait s'évaluer autour de 167 hm^3 .

L'écart entre les nombreuses estimations (120 hm^3 et 167 hm^3) est dû à l'apport rajouté engendré par l'écoulement de la partie de la superficie existante entre la station de Tilesdit et l'exutoire du bassin Eddous (à la confluence de Boussellem et Eddous).

Nous retenons que l'écoulement moyen annuel au niveau du bassin d'Eddous est de 167 hm^3 . Cependant, nous n'avons pas les résultats exacts de l'écoulement moyen annuel mesuré à l'exutoire du sous bassin d'Eddous.

- L'Oued Boussellem à Sidi Yahia

La station de Sidi Yahia dispose de 24 années d'enregistrement. Elle contrôle un bassin versant de 3 890 km² et a servi à dimensionner le barrage de Tichi Haf (tableau 45).

En considérant la pluviométrie moyenne annuelle du bassin Eddous de 468mm, soit 99,15% de la pluviosité du bassin de Boussellem, l'apport moyen annuel au niveau de cette station varie entre 36,1hm³ et 306,6hm³, soit un apport interannuel de 165,4hm³, ce qui représente une hauteur de ruissellement à Sidi Yahia d'environ 40,8mm (Kessasra, 2006).

Tableau 45 : Caractéristiques hydrologiques au barrage de Tichi Haf

N°	Caractéristiques	Valeurs	Unité
1	Surface du bassin versant	3.890	km ²
2	Précipitation moyenne	750	mm
3	Apport moyen interannuel	185,4	hm ³
4	Apports solides	47,26	hm ³ / an

· La Soummam à Sidi Aïch

La station de Sidi Aïch est située à 40 km de l'embouchure de l'oued vers la mer. Elle couvre une superficie de 8 420 km². Cette station possède 37 années d'observations avec 10 ans d'interruption.

L'écoulement moyen annuel est déterminé en évaluant l'écoulement du sous-bassin d'Eddous, lui ajouter l'écoulement du sous-bassin de Boussellem, puis leur additionner à leur point de confluence, le débit produit entre celle-ci et la station de Sidi Aïch.

L'écoulement produit par le sous-bassin d'Eddous déjà défini est de 167,43 hm³, celui produit par le sous-bassin de Boussellem est de 165,4 hm³.

Cependant, l'écoulement moyen annuel mesuré au niveau de la station de Sidi Aïch est de 465,1 hm³ (ANB2003). Compte tenu de la pluviosité moyenne annuelle de l'ordre de 600 mm entre le point de confluence et la station de Sidi Aïch, l'écoulement moyen annuel dans cette zone est de l'ordre de 132,7 hm³.

6.2.3 Estimation de l'écoulement de la Soummam vers la mer

L'écoulement moyen annuel de la Soummam à Sidi Aïch a été mesuré à 465,1 hm³ par an, l'aire additionnelle de drainage entre Sidi Aïch et l'embouchure est de quelque 800 km², avec une pluviosité moyenne annuelle de l'ordre de 600 mm (Kessasra, 2006).

L'écoulement unitaire annuel dans cette zone est de 150 hm³ par an. L'écoulement moyen annuel à l'embouchure de la Soummam (tableau 46) peut être estimé à 615,1 hm³ par an.

Tableau 46 : Débits des écoulements moyens annuels du bassin versant de la Soummam

Sous bassin	Précipitation moyenne Interannuelle (mm)	Débit écoulé (en hm ³ /an)
Eddous – Sahel Boussellem Soummam à Sidi Aïch	470 480 716	167 165.4 465.1
Total sur le bassin à l'exutoire	600	615.1

6.3 ESTIMATION DU BILAN HYDROLOGIQUE

Pour notre zone d'étude qui est une région montagneuse, nous avons utilisé pour les quatre stations considérées, les résultats de la méthode du bilan de Thornthwaite, qui est universellement appliquée.

Le ruissellement a été évalué par l'application de la formule de Tixeront-Berkaloff. Les résultats des différents termes de l'équation du bilan hydrologique sont résumés dans le tableau 47.

Tableau 47 : Valeurs des termes du bilan hydrologique au niveau des quatre stations étudiées

Stations	ETP	ETR	P	R	Cr	I
Béjaïa	895,96	553,64	738	166	0,23	185
Bouira	887,19	425,78	489	50	0,10	65
Sétif	808,66	403,00	402	33	0,08	0
BBA	844,40	361,00	361	22	0,06	0
Moyenne	859,05	435,86	498	68	0,14	63

L'observation de la figure 41 du bilan hydrologique des stations étudiées, nous amène à dire que l'ETP est de l'ordre de 859mm, les précipitations sont estimées entre 361 et 738 mm et l'évapotranspiration réelle est comprise entre 347 et 554mm.

L'application numérique donne un ruissellement moyen de 166 mm à la station de Béjaïa, ce qui représente 23 % des précipitations; par contre aux niveaux des stations de Bouira, Sétif et BBA, elle est respectivement de 50, 33 et 22mm. L'excédent des précipitations qui engendre l'infiltration vers la nappe quand la réserve facilement utilisable est maximale, est de 185 et 65mm respectivement aux stations de Béjaïa et Bouira. Ce qui n'est pas le cas pour les deux autres stations où l'infiltration est nulle.

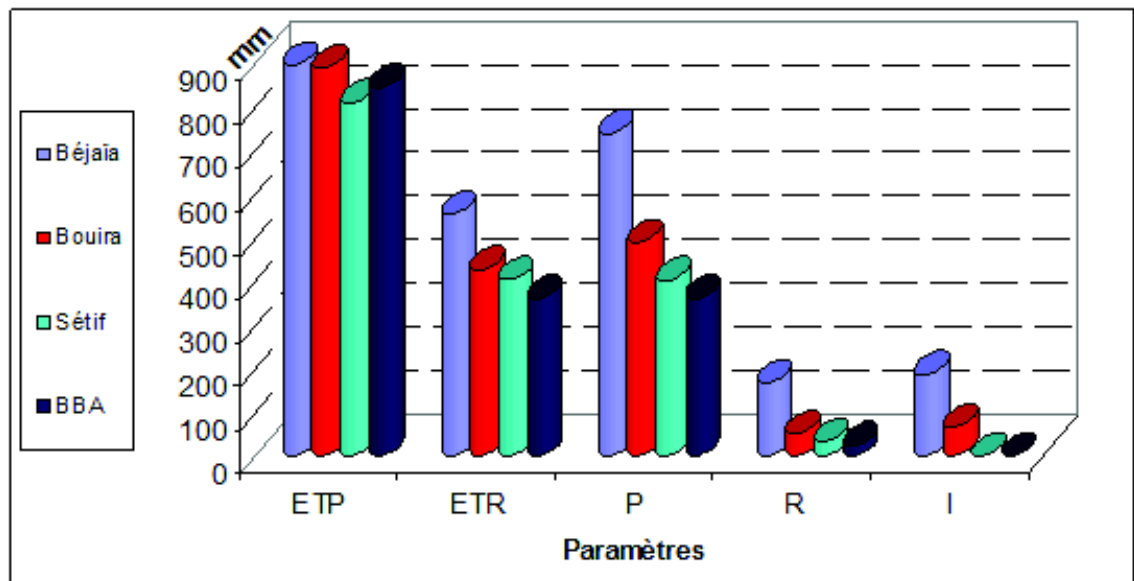


Figure 41 : Valeurs des termes du bilan hydrologique du bassin de la Soummam

Le bilan hydrologique calculé au niveau des stations étudiées n'est pas équilibré, il faut voir là soit une surestimation du ruissellement et/ou de l'infiltration calculée (la méthode du bilan de Thornthwaite ne nous donne qu'un ordre de grandeur).

CONCLUSION

Les paramètres ETP et ETR sont quantifiés par l'application de diverses formules empiriques.

Les résultats de l'ETR auxquels nous avons aboutis sont relativement les mêmes aux différentes méthodes et ne couvre que 49% de l'ETP. Elle consomme 85% des précipitations. Ceci induit un faible excédent et par conséquent une faible recharge de la nappe.

Les données des quatre stations utilisées nous ont permis de déterminer une pluviométrie moyenne de 498mm, dont 422mm se sont évapotranspirées. Le ruissellement représente quant à lui 14 % des précipitations, soit une lame d'eau moyenne annuelle de 68mm. L'infiltration ne laisse percoler que 63 mm, ce qui ne représente que 13% des précipitations, d'où une alimentation de la nappe qui ne se fait pas exclusivement à l'aide d'une infiltration efficace.

Les mécanismes physiques régissant le bilan hydrique sont tellement complexes que leur prise en compte par une simple estimation en appliquant les diverses expressions empiriques reste en deçà des attentes. Par conséquent, il nous est apparu nécessaire d'entreprendre des extrapolations spatiales des composantes du bilan à savoir les précipitations, l'ETR et l'écoulement, plus précisément pour les zones géographiques où il existe une absence d'information hydrologique.

CHAPITRE 7 : CARTOGRAPHIE AUTOMATIQUE

INTRODUCTION

Au-delà du long travail de traitement des données de base, il apparaît nécessaire de quantifier les variables géo-topographiques, induisant les variations dans les trois dimensions de l'espace du phénomène étudié que seule la densité du réseau de mesures ne pouvait appréhender.

Chacun des termes du bilan hydrologique est naturellement pondéré par divers paramètres climatiques et géographiques et aura donc une importance variable selon la région considérée comme le relief qui conditionne le pouvoir précipitant des masses nuageuses.

Il s'avère que d'autres paramètres climatiques, comme la température de l'air, l'écoulement ou l'évapotranspiration réelle, se prêtent aisément à l'interpolation et par conséquent à la cartographie automatique (Davtian, 1998).

La répartition spatiale des pluies mensuelles moyennes obéit-elle à la loi pluie-relief tout comme les pluies annuelles moyennes. Ces bases d'information, à référence spatio-temporelle, sont susceptibles d'être utilisées dans des systèmes d'informations géographiques (Touazi, 2001), outils devenus indispensables dans divers domaines d'étude et d'aide à la décision (eau, agriculture, aménagement du territoire, environnement,...etc.).

Dans cette partie nous avons produit les images de synthèse illustrant les paramètres climatologiques, sur fond géographique à partir des données relevées par les stations du réseau de mesures. Les cartes produites sont présentées en coordonnées kilométriques Lambert.

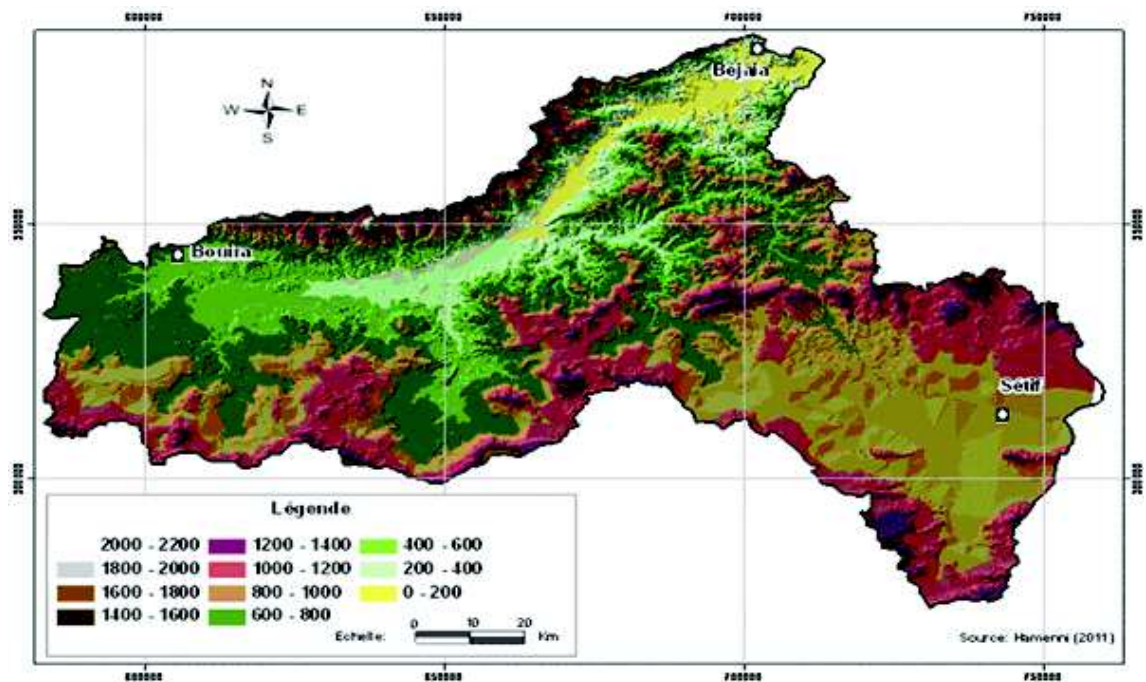
La première phase de cartographie a donc consisté en établissement d'un Modèle Numérique d'altitude (MNA) à partir des courbes de niveau du bassin versant de la Soummam à l'échelle 1/50.000.

Connaissant à la fois les hauteurs de pluies observées aux points de mesure (information connue de façon discrète) et le relief (connu de façon continu à travers le Modèle Numérique d'altitude), il devient possible de valoriser l'information pluviométrique à l'aide des méthodes statistiques (régression multiple). Le krigeage du champ des résidus de la régression permet de procéder à la combinaison de l'équation de régression et du résidu interpolé pour obtenir, au final, la représentation du champ pluviométrique.

7.1 CARTE HYSOMETRIQUE

A travers la carte hypsométrique du bassin versant de la Soummam (figure 42) qui représente la première étape d'interpolation, nous remarquons que le relief est constitué de bandes orientées du Nord au Sud.

La zone des basses altitudes est située dans la bande jaune, elle correspond à la vallée de la Soummam et la zone des hautes altitudes est située dans le Nord (bande marron), elle correspond à des massifs montagneux importants avec un relief le plus élevé de 2150m. Nous trouvons cette bande aussi, dans la chaîne de la basse Kabylie dont l'altitude maximum est de 2004m (Babors). La zone qui couvre une grande partie du Sud du bassin (bande de couleur moutarde) se trouve à des altitudes comprises entre 800 et 1000 m.



7.2 REGRESSION MULTIPLE

La représentation du champ des précipitations moyennes de chaque mois est obtenue à l'aide d'une régression multiple entre les précipitations et les éléments explicatifs du relief (la latitude 'Y', la longitude 'X' et l'altitude 'Z').

Dans notre cas, nous avons appliqué cette méthode pour la restitution des cartes pluviométriques de chaque mois ainsi que la carte annuelle pour une durée de 36 ans.

Nous avons calculé pour chaque mois, les paramètres d'une régression linéaire multiple entre la précipitation moyenne mensuelle (P) et les paramètres susceptibles d'être explicatifs :

- X la longitude du poste exprimée en coordonnées Lambert (Km) ;
- Y la latitude du poste exprimée en coordonnées Lambert (Km) ;
- Z l'altitude du poste exprimée en m.

$$P \text{ (en mm)} = a X + b Y + c Z + d$$

a, b et c représentent les coefficients relatifs aux variables X, Y et Z ; d est le terme constant de la régression. Pour caractériser la validité de ces régressions, nous avons également calculé le coefficient de régression multiple. Les résultats numériques sont consignés dans le tableau 48.

Application et interprétation

L'interprétation des équations de régression multiple obtenues est faite sous forme graphique, à partir des paramètres topographiques : longitude, latitude et altitude.

Le coefficient de corrélation théorique R_a des formules explicatives du paramètre précipitation est de 0.45, avec la probabilité $\alpha = 5\%$. Au-delà de cette valeur nous pouvons dire que tous les coefficients R sont significatifs.

La régression multiple calculée et observée entre les variables, se traduit par un coefficient de corrélation annuel élevé ($R = 0,89$) ce qui est également significatif.

Coefficient de corrélation

Les résultats sont assez satisfaisants puisque les coefficients de corrélation multiple sont supérieurs au coefficient théorique R_a . La courbe (figure 43) indique que la majorité des mois, la variation des précipitations est considérablement expliquée par les paramètres topographiques : longitude, latitude et altitude, mais pas autant pour les mois de juillet et août.

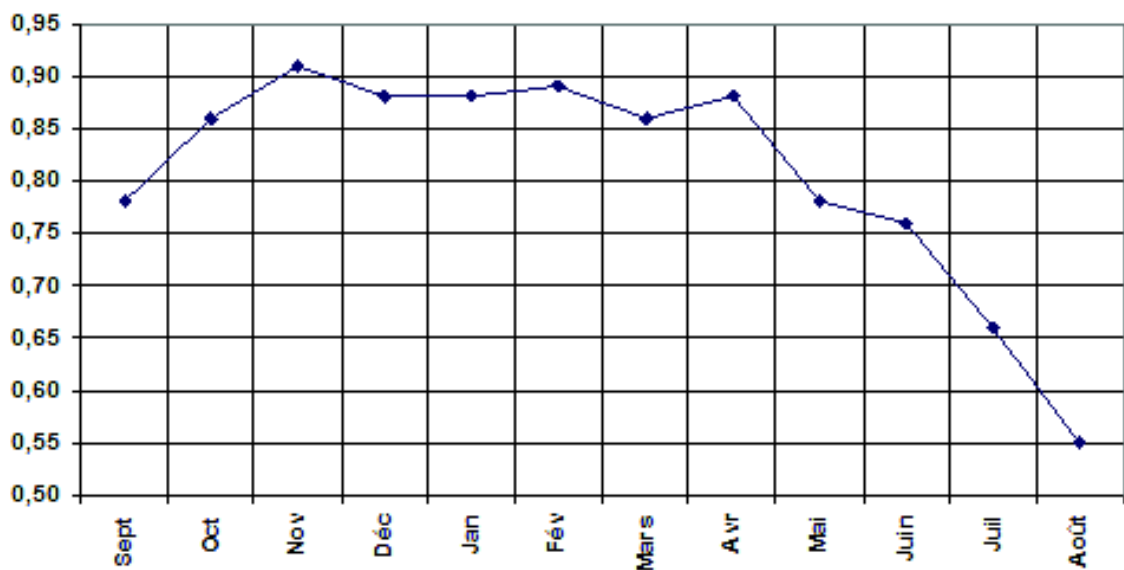


Figure 43 : Evolution mensuelle des coefficients de corrélation multiple

Longitude

Nous remarquons bien l'influence du facteur topographique longitude, par les coefficients relatifs à celui-ci sur le comportement des précipitations au cours des mois de l'année. Le coefficient relatif à la variable X (longitude) agit de façon à ce qu'il fait baisser les précipitations (figure 44), mais augmentent légèrement du mois de novembre jusqu'en été où les valeurs sont positives (juin à septembre).

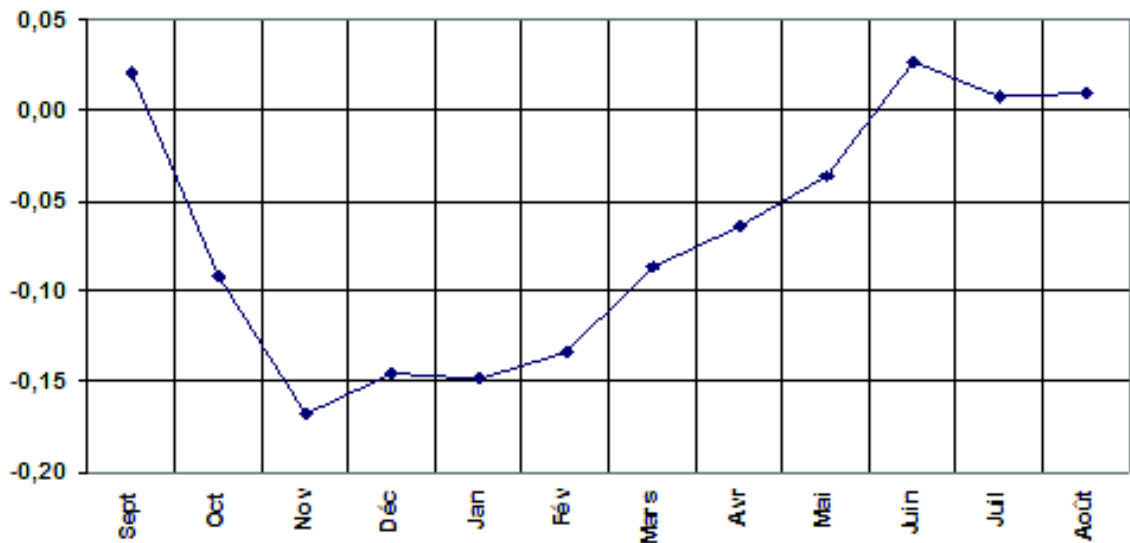


Figure 44 : Evolution des gradients longitudinaux par rapport à X

Latitude

Nous constatons que le coefficient relatif à la variable de Y est élevé par rapport à celui enregistrée pour la longitude et influe positivement sur la quantité de pluie précipitée dans l'espace étudié, ceci, peut être constaté pour les mois de novembre à février (figure 45). Nous remarquons que les valeurs des précipitations diminuent progressivement jusqu'en été, sous l'effet de la latitude.

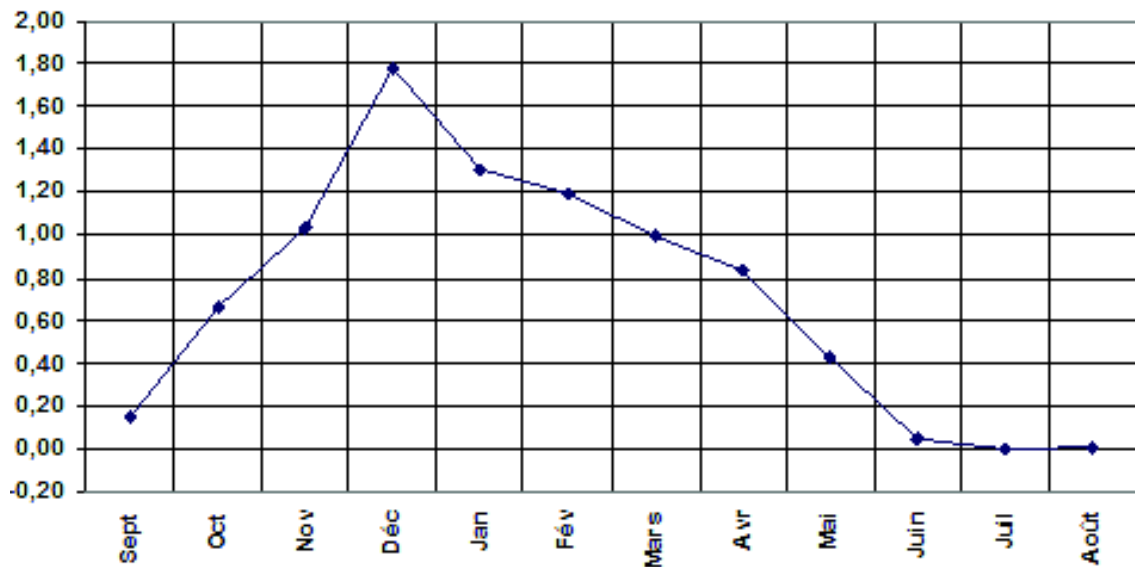


Figure 45 : Evolution des gradients latitudinaux par rapport à Y

d- **Altitude**

Le comportement de la quantité de précipitations face à l'altitude (figure 46) est en accroissement de septembre à décembre, puis en descendance jusqu'en été.

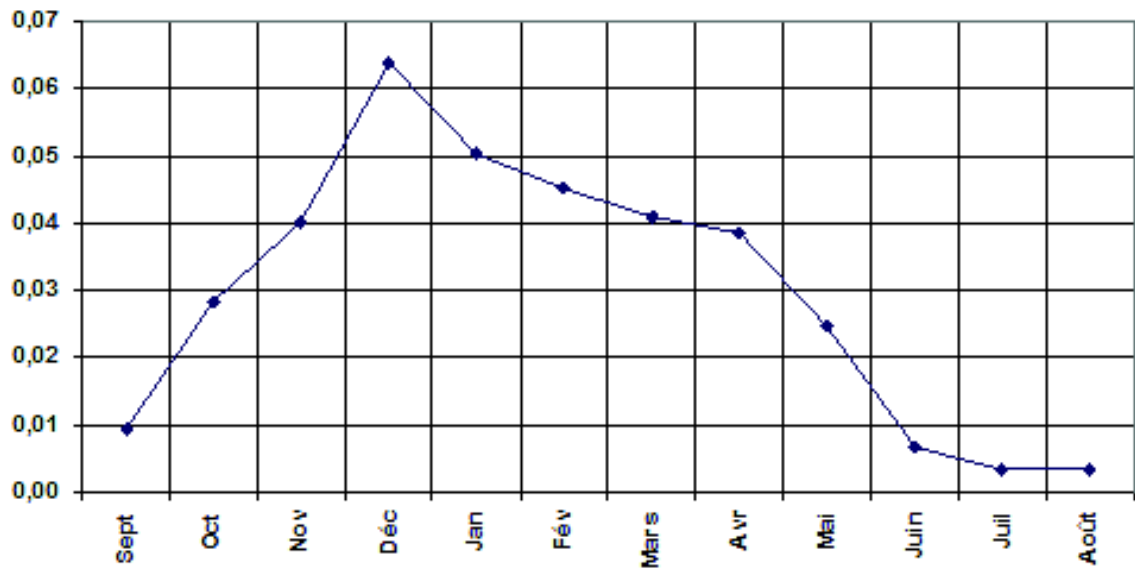


Figure 46 : Evolution des gradients de l'altitude par rapport à Z

e- Constante

Les coefficients sont très bas par rapport à ceux relatif aux variables X, Y et Z, néanmoins le graphique (figure 47) illustre bien cette évolution saisonnière des précipitations.

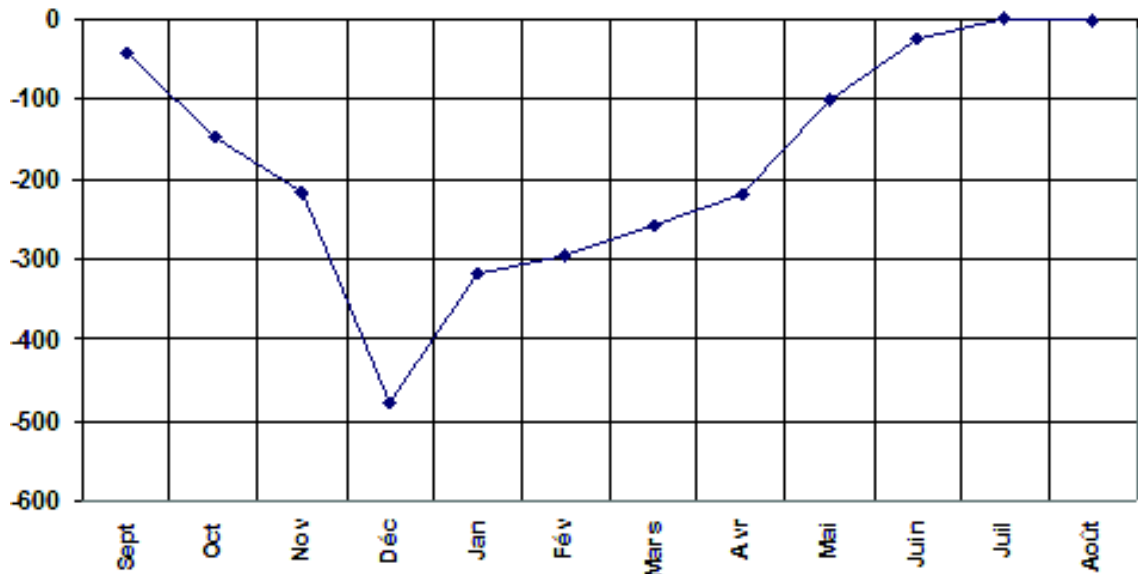


Figure 47 : Evolution mensuelle du terme constant

Nous pouvons conclure que, les précipitations changent dans l'espace d'étude beaucoup plus avec l'effet de la latitude où les valeurs sont nettement plus élevées, cela indique sur l'importance de l'effet des autres composantes du milieu sur les précipitations.

L'ensemble des figures représente la façon avec laquelle les précipitations se comportent, sous la conséquence de l'ensemble des autres effets des variables du milieu (exposition, pente,...etc.).

7.3 CARTOGRAPHIE DES PRECIPITATIONS

A cet effet, nous avons procédé à la cartographie des pluies à l'échelle annuelles et mensuelles.

Seltzer (1946), Dubief (1963), Chaumont et Paquin (1971) et l'ANRH (1993) ont étudié la pluviométrie en Algérie et ont montré que le pays est soumis à l'influence conjuguée de la mer, du relief et de l'altitude.

Seltzer (1946) a montré que la répartition des pluies en Algérie obéit aux trois lois suivantes:

- la hauteur de pluie augmente avec l'altitude mais est plus élevée sur les versants exposés aux vents humides que sur les versants sous le vent. ;
- elle augmente de l'Ouest à l'Est. ;
- elle diminue à mesure que l'on s'éloigne du littoral.

7.3.1 Les précipitations annuelles

Notre carte de la répartition spatiale de la pluviométrie moyenne du bassin de la Soummam (figure 48) représente un échantillon caractéristique au niveau du Nord-Est Algérien. Elle est déduite de la répartition des précipitations moyennes interannuelles des 35 stations (1968-2004) construite à partir des données traitées dans le chapitre 5.

Nous constatons que la quantité annuelle de précipitation tend à diminuer du Nord-Est (Tifra /Tizi N'Braham) vers le Sud-Ouest (Tixter /Ain Nessissa), les pluies sont moins arrosées à mesure que l'on s'éloigne du littoral à cause de l'appauvrissement progressif de l'atmosphère en vapeur d'eau, lors du passage des courants aériens qui abandonnent leurs pluies en franchissant les chaînes montagneuses.

La chaîne de Djurdjura qui s'étend parallèlement à la vallée de la Soummam, constitue une barrière naturelle aux masses d'air humide venant du Nord. Ces masses deviennent sèches dès qu'elles traversent les hauteurs de Djurdjura. En descendant dans la vallée de la Soummam, elles se réchauffent dynamiquement, conduisant ainsi à une faible précipitation.

L'interprétation des histogrammes de précipitations (figure 49) fait ressortir ce qui suit :

Sous bassin Eddous–Sahel

La station de Souk El Khemis située à 782 m d'altitude présente le maximum de pluies, soit 505 mm, que nous pouvons expliquer par son rapprochement des versants du Djurdjura. Par contre, la station la moins arrosée est celle d'Aïn Nessissa située à une altitude de 680 m avec une pluviométrie de 217 mm, vu que cette station est positionnée dans le bassin versant du Hodna caractérisé par un climat aride.

Sous bassin Soummam

Les stations de Aït Aïcha et Tifra situées respectivement à 1000 et 450m d'altitude présentent le maximum de pluies soit respectivement 1037 et 820 mm, ces valeurs sont justifiées par le fait que les stations sont à proximité des versants de la basse Kabylie.

Sous bassin Boussellem

La station de Tizi N'braham située à 860m d'altitude présente le maximum de pluies, soit 613mm, que nous pouvons expliquer par l'effet de l'influence marine, alors que la pluviométrie enregistrée au niveau de la station de Tixter située à une altitude de 960m est de 240mm, due par son éloignement de la mer.

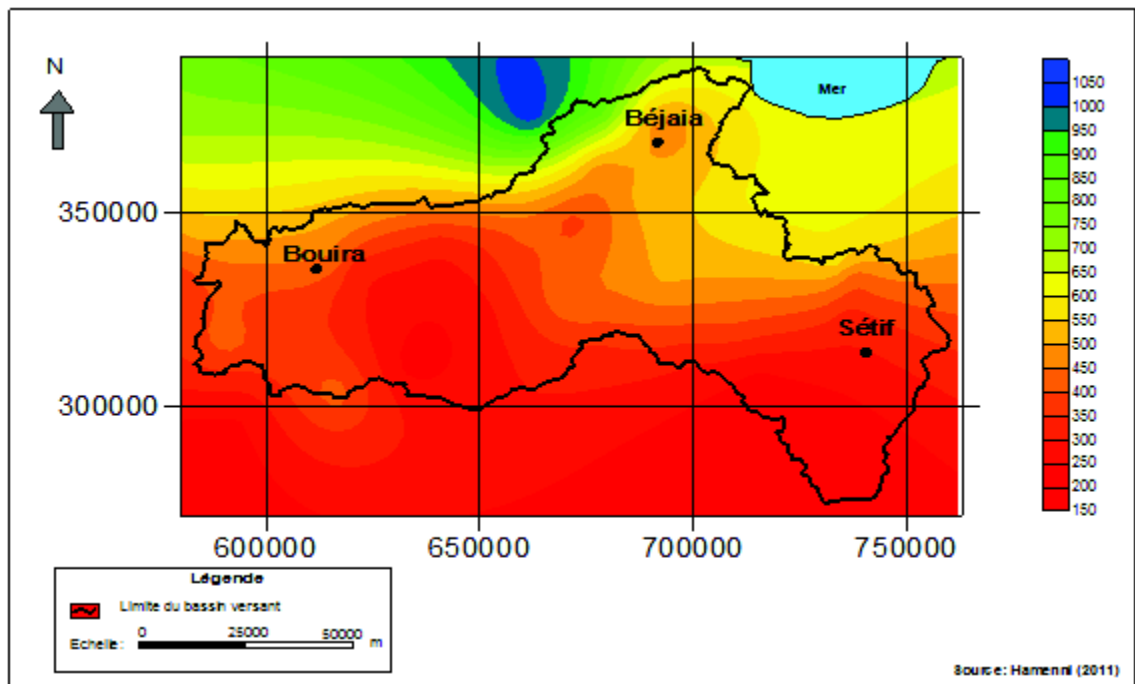


Figure 48 : Carte des précipitations moyennes interannuelles (1968-2004)

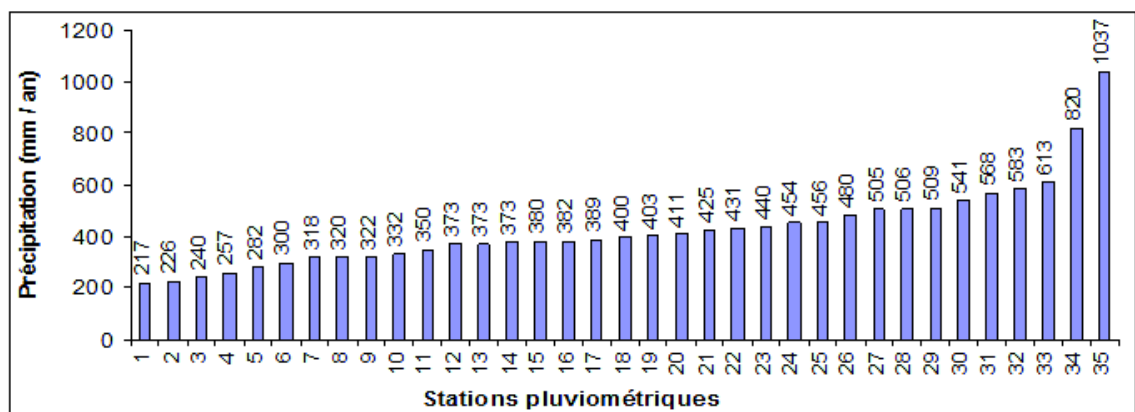


Figure 49: Répartition par ordre croissant des lames précipitées annuelles moyennes durant la période 1968-2004

1. Aïn Nessissa	10. Aïn Arnat	19. Bouira Coligny	28. Souk El Khemis
2. Ben Daoud	11. Medjana	20. Mahouane	29. Zeiri
3. Tixter	12. El Hachimia	21. S.El Ghozlane	30. Boubirek
4. Dirah Centre	13. Khabouzia	22. Taghdit S.Khemis	31. Aïn Abessa
5. Porte de Fer	14. Bir Kasdali	23. Bouira	32. Amouchas
6. El Haourane	15. Tazmalt	24. Teniet Enasr	33. Tizi N'braham
7. Mechedallah	16. Sidi Yahia	25. D ^{ne} Maouche	34. Tifra
8. El Asnam	17. Ighil Ali	Ahmed	35. Aït Aïcha
9. Sidi Embarek	18. Fermatou	26. Seddouk	
		27. Zemourah	

7.3.2 Approche cartographique au pas de temps mensuel

La répartition spatiale des précipitations durant les 12 mois est caractérisée par un gradient Nord-Sud bien marqué et un gradient Est-Ouest plus faible, la bande de couleur (figure 50) passe du vert (zone arrosée) au jaune puis vers le rouge (zone sèche) selon les mois. Le partage de l'année hydrologique est bien vérifié à travers le comportement pluviométrique durant les différents mois. Les précipitations sont en général au plus fort au mois de décembre où, les isovaleurs oscillent entre 18,9mm et 178mm. En revanche, pendant le mois de juillet où les précipitations sont les plus basses (bande rouge dans toute la région), les courbes isovaleurs varient de 0,8 à 9,2mm.

Par contre, le Sud-Ouest à climat semi aride et plus sec, est moins arrosé durant toute l'année, vue que cette zone est positionnée dans le bassin versant du Hodna caractérisé par un climat aride.

7.4 Cartographie des isothermes annuels

Considérant la faible variabilité des températures d'une année à l'autre, les gradients thermométriques utilisés pour le bassin de la Soummam, sont ceux mis au point dans l'étude de synthèse des E.T.P. de l'Algérie du Nord (A.N.R.H., 2002a). C'est ainsi que nous pouvons calculer les températures estimées aux différentes stations (35) situées au Nord du pays.

· Régression multiple

Les résultats de l'analyse statistique (régression multiple) entre la température moyenne mensuelle observée aux postes thermométriques (t) et les paramètres du relief susceptibles d'être explicatifs sont consignés dans le tableau 49.

Mois	Coefficients			Terme constant	R
	gradient thermométrique par rapport à				
	x	y	z		
Septembre	0,0021	-0,0094	-0,0042	26,60	0,82
Octobre	0,0006	-0,0044	-0,0052	21,55	0,93
Novembre	-0,0004	-0,0013	-0,0061	16,75	0,94
Décembre	-0,0014	0,0009	-0,0063	13,40	0,94
Janvier	-0,0016	0,0004	-0,0060	12,35	0,95
Février	-0,0010	-0,0033	-0,0061	14,27	0,96
Mars	0,0000	-0,0065	-0,0056	16,52	0,94
Avril	0,0017	-0,0117	-0,0052	19,30	0,90
Mai	0,0026	-0,0144	-0,0046	23,01	0,82
Juin	0,0041	-0,0184	-0,0037	27,13	0,70
Juillet	0,0032	-0,0186	-0,0026	30,76	0,57
Août	0,0018	-0,0132	-0,0028	30,46	0,55

Tableau 49 : Paramètres de régression entre température et relief de l'Algérie du Nord (Etude E.T.P. de l'Algérie du Nord, A.N.R.H., 2002a)

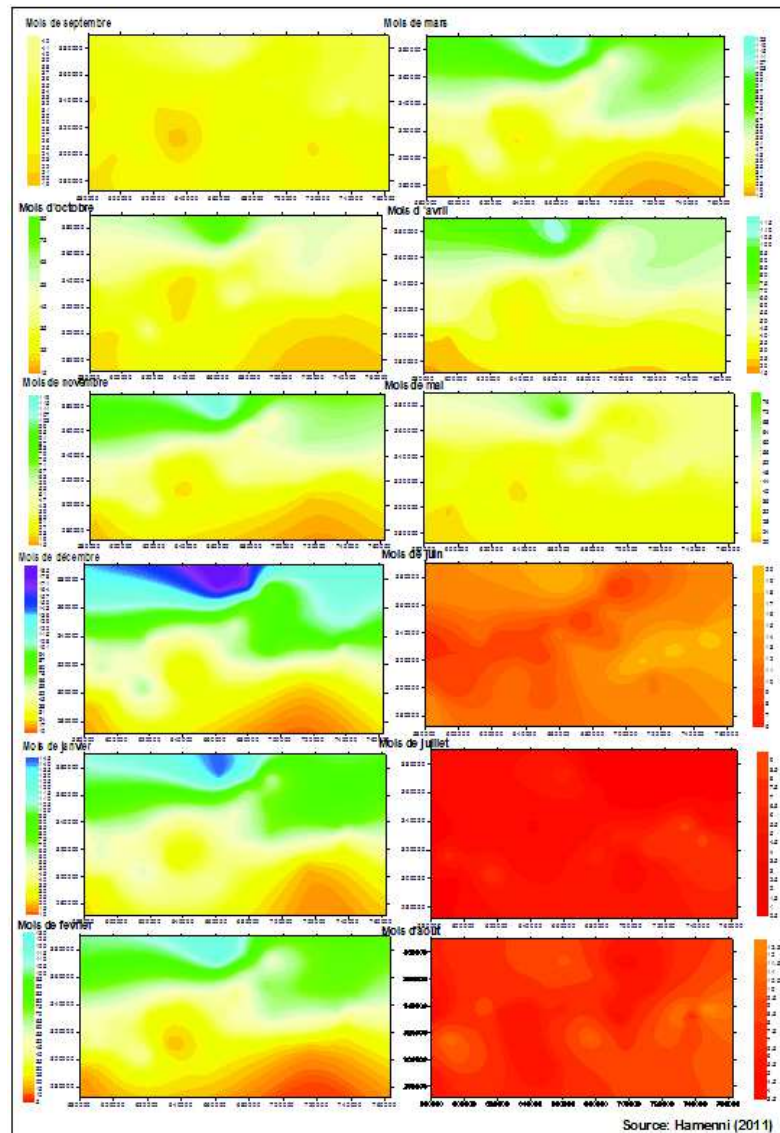


Figure 50 : Cartes des précipitations moyennes mensuelles (1968-2004)

Le coefficient de corrélation théorique R_a des distinctes formules explicatives du paramètre température est de 0.42, avec la probabilité $\alpha = 5\%$.

Les résultats (figure 51) sont assez satisfaisants puisque les coefficients de corrélation multiple sont supérieurs à 0.8 de septembre à mai et, 0.7, 0.57 et 0.55 respectivement en juin, juillet et août où nous retrouvons une variation saisonnière régulière.

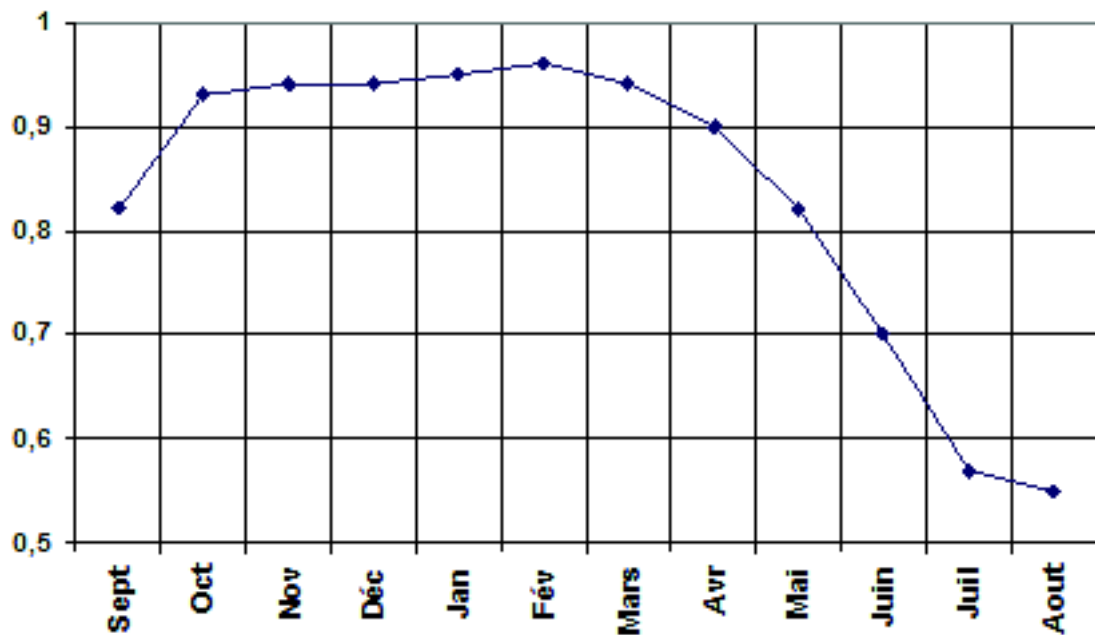


Figure 51 : Evolution mensuelle des coefficients de corrélation multiple

L'évolution de la constante doit représenter la fluctuation de température en un site de coordonnées $x = 0$ et $y = 0$ (Sud-Ouest de la zone d'étude) et à une altitude nulle. La figure 52 illustre bien cette évolution saisonnière des températures.

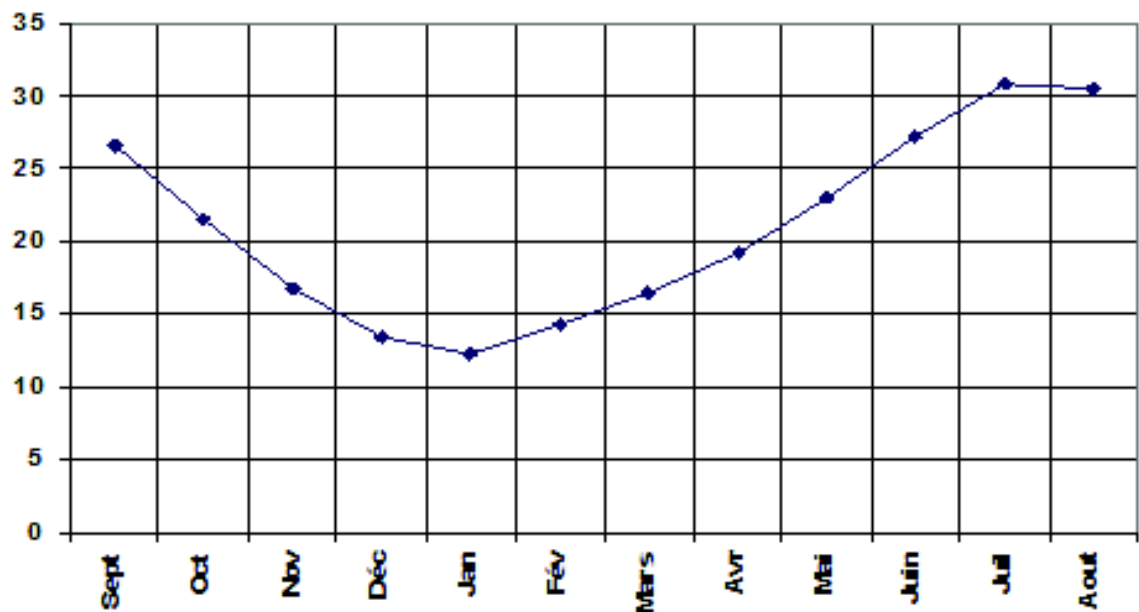


Figure 52 : Evolution mensuelle du terme constant

L'évolution des gradients est tout aussi significative. Le gradient altimétriques varie de $-0,0026$ en juillet ($0,24^\circ/100m$) à $-0,0063$ en décembre ($0,6^\circ/100m$).

Le gradient de X (longitude) est généralement faible mais il montre clairement des valeurs positives en été (température plus fortes à l'Est en cette saison).

Le gradient de Y est toujours négatif (plus chaud au Sud), mais cette tendance est beaucoup plus marquée en été qu'en hiver (figure 53).

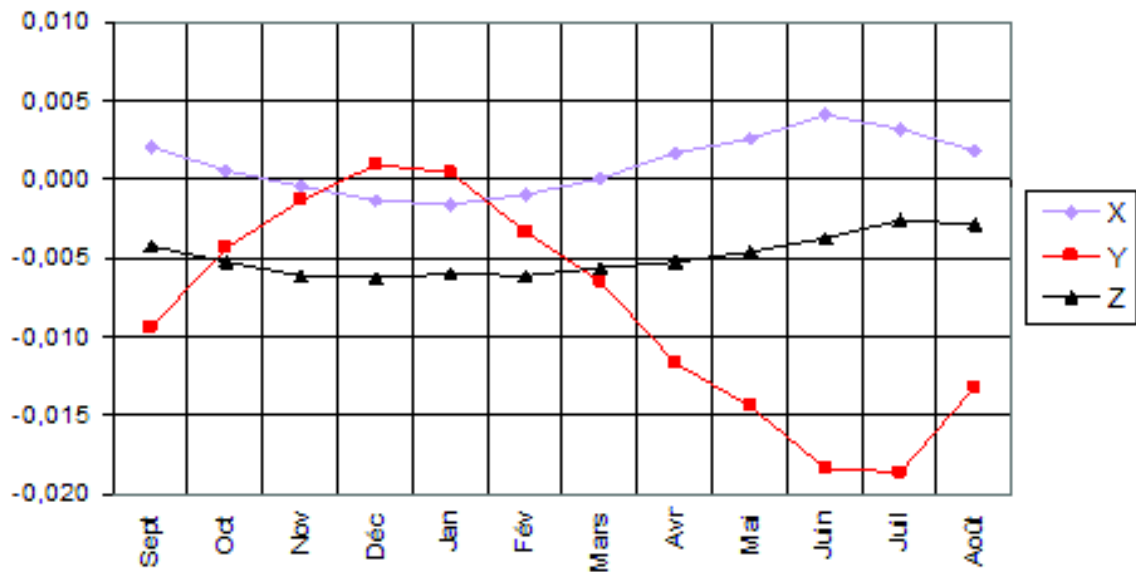


Figure 53 : Evolution des gradients thermométriques par rapport à X, Y et Z

En conclusion on retiendra qu'en hiver au moins une part essentielle de la variance spatiale des températures s'explique par des variables connues : la position et l'altitude.

Cartographie annuelle des températures

Nous remarquons, d'après la carte (figure 54) que l'intervalle de température est de $4,8^{\circ}\text{C}$ et la température est légèrement plus fraîche au Sud-Est (semi aride) qu'au Nord (sub-humide). Cependant, nous constatons que les températures sont proportionnelles aux reliefs sauf au Nord de la région, ceci est dû au manque de stations limitrophes qui ont influencé sur l'interpolation spatiale.

Les températures, relativement élevées sur le littoral, diminuent vers l'intérieur c'est-à-dire de la bande de couleur marron (vallée de la Soummam) à la bande bleue (haute altitude) dans la région Sud-Est, en raison de la continentalité (abaissement des isothermes d'hiver).

7.5 Cartographie des évapotranspirations potentielle (ETP)

La cartographie des ETP de l'Algérie du Nord (ANRH, 2002) est un outil supplémentaire qui permet d'éviter de faire recours à des calculs par le biais de formules empiriques. Elle offre l'avantage de connaître en tout point de l'espace les valeurs annuelles moyennes de l'évapotranspiration potentielle.

Son élaboration a nécessité, au préalable, la validation d'une formule empirique valable pour l'Algérie dite «ETP, ANRH» (figure 55).

La carte nous indique, des isovaleurs annuelles moyennes comprises entre 900 et 1.500mm, auréoles qui épousent principalement les massifs humides du littoral et les sommets les plus élevés du bassin de la Soummam.

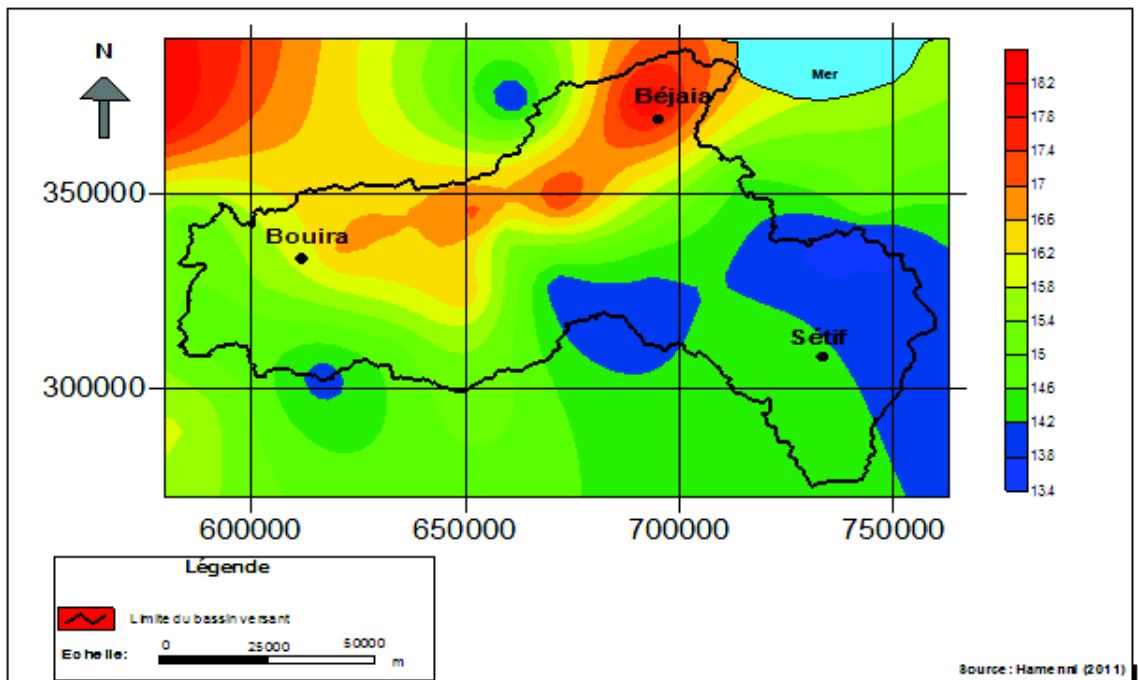


Figure 54 : Carte des températures annuelles moyennes (1968-2004)

Source : ANRH 2002

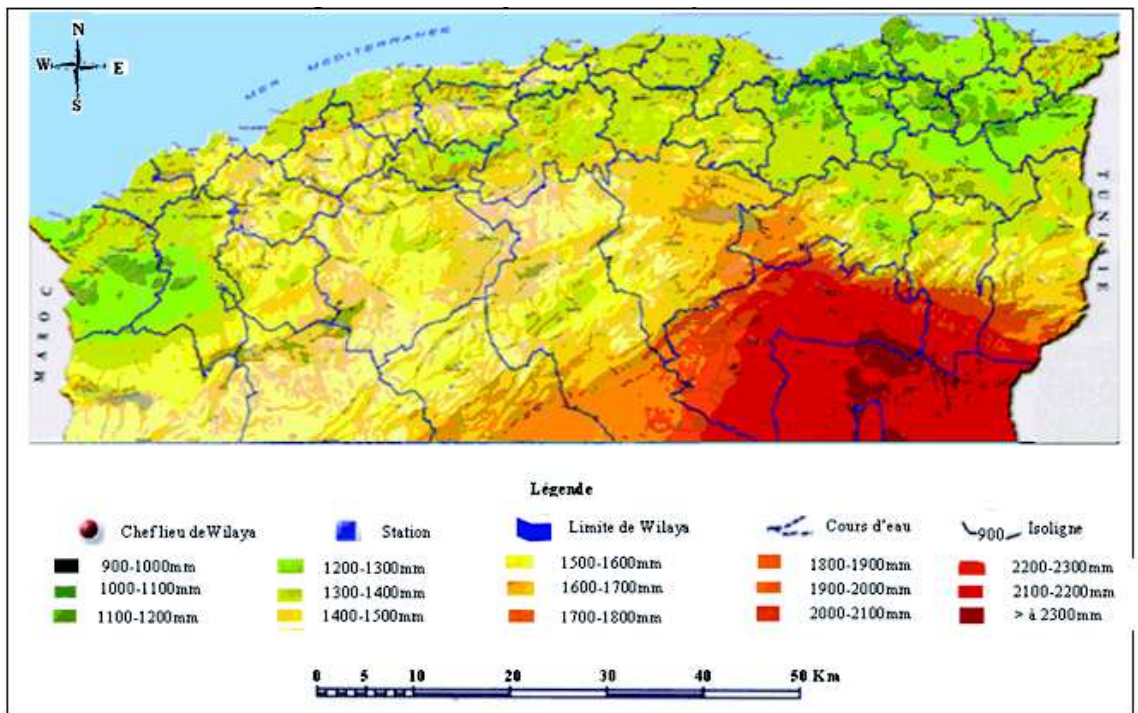


Figure 55 : Carte des évapotranspirations de l'Algérie du Nord

7.6 Evapotranspiration réelle (ETR)

Il devient ainsi aisé, par application de la formule de Turc, de construire la grille des évapotranspirations réelles annuelles moyennes couvrant le bassin de la Soummam.

La carte de déficit d'écoulement (figure 56) montre bien une zone balayée par les courbes d'ETR dont les bandes de couleur varient de 200mm à plus de 600 mm. Ceci illustre bien la dépendance de l'évaporation par rapport aux précipitations.

Le profil de l'ETR épouse sensiblement celui des précipitations. Les deux cartes (figures 48 et 56) s'ordonnent de façon quasiment identique : décroissance du Nord-Est vers le Sud-Ouest avec sensiblement un gradient latitudinal marqué, entre la zone (littoral et Tell).

7.7 Ecoulements

La formule de Turc a montré sa bonne corrélation avec les déficits d'écoulement issus des bilans hydrologiques interannuels. Traitée dans le chapitre 6, cette formule de Turc (1949) convient par le fait qu'elle se base sur deux paramètres climatiques mesurés (P et T) dont les variations sont en rapport avec celles du relief.

Il devient, à ce stade, possible de déterminer la tranche d'eau représentant l'écoulement, troisième et dernier terme du bilan hydrologique pluriannuel d'un bassin où la variation du stock en eaux souterraines est négligeable (même valeur des réserves au début et à la fin de la période considérée) devant les précipitations et les écoulements. La combinaison de la grille du déficit d'écoulement (D) et celle des précipitations (P) déjà disponibles, permet d'obtenir par différence une grille des lames d'écoulement annuel moyen ($E = P - D$).

La carte des écoulements obtenue (figure 57) traduit bien les contrastes hydrologiques très marqués de la région d'étude. Elle révèle de grandes disparités dans la répartition de la ressource en eau de surface dans le bassin : de 2mm par an dans le Sud-Ouest (bandes de couleur rouge et marron) et plus de 400 mm par an sur le littoral maritime (bandes de couleur verte et jaune).

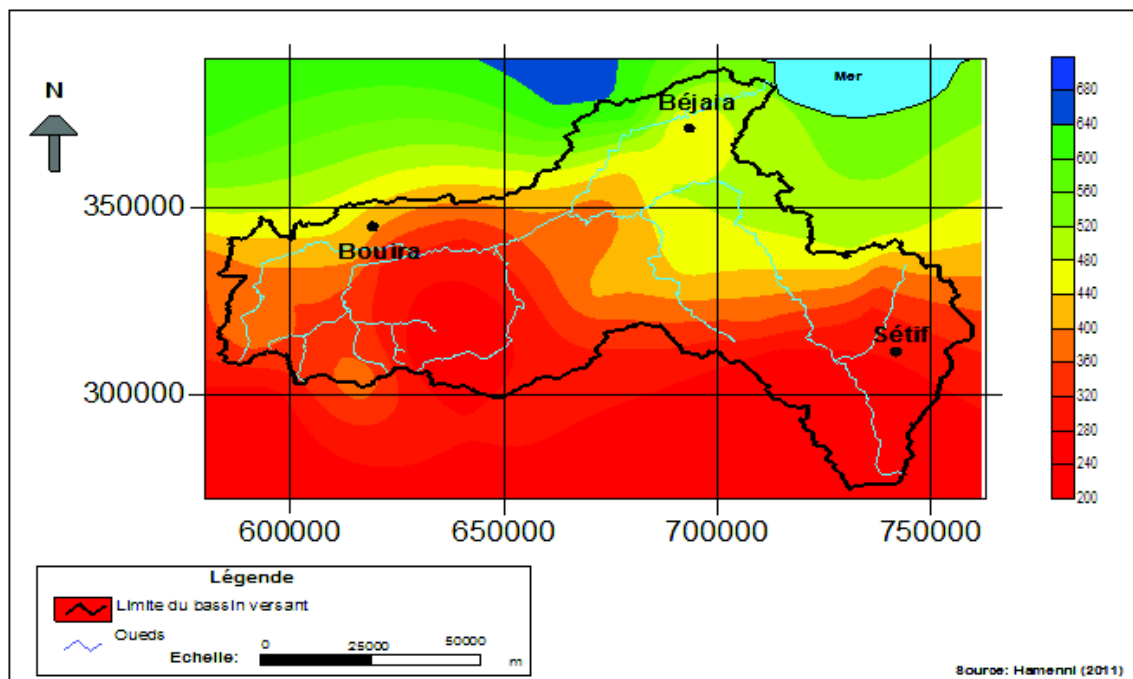


Figure 56 : Carte d'évapotranspirations réelles annuelles moyennes (1968-2004)

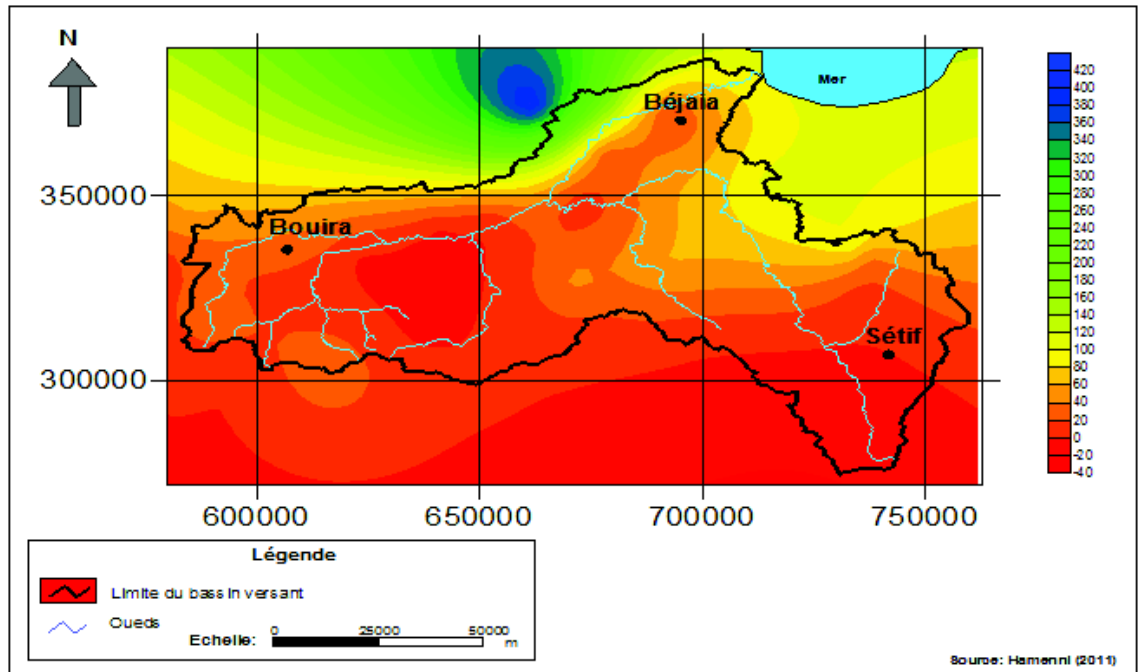


Figure 57 : Carte des écoulements annuels moyens (1968-2004)

CONCLUSION

Le réchauffement climatique actuel est concomitant en Algérie entre autres, avec une baisse de la pluviométrie qui engendre un déficit hydrique notable et par la forte évaporation qui caractérise la région et accentue ce déficit d'eau.

Nous avons exploité des données climatiques annuelles et mensuelles établies sur plusieurs années d'observations (36 ans) afin d'aboutir à une carte spatiale des précipitations du bassin versant de la Soummam par un modèle statistique permettant d'estimer les précipitations mois par mois en fonction de facteurs physiographiques ainsi que le bilan hydrologique.

La répartition de la pluie subit trois influences, celle de l'altitude, de la longitude et enfin celle de l'éloignement à la mer. Dans notre zone d'étude, nous pouvons conclure que, les précipitations changent dans l'espace d'étude beaucoup plus avec l'effet de la latitude où les valeurs sont nettement plus élevées, cela indique sur l'importance de l'effet des autres composantes du milieu sur les précipitations.

Les pluies sont moins importantes à mesure que l'on s'éloigne du littoral à cause de l'appauvrissement progressif de l'atmosphère en vapeur d'eau, lors du passage des courants aériens qui abandonnent leurs pluies en franchissant les chaînes montagneuses. Le partage de l'année hydrologique est bien vérifié à travers le comportement pluviométrique durant les différents mois où les pluies sont plus arrosées en hivers.

La variance spatiale des températures s'explique par des variables connues : la position et l'altitude, elles augmentent avec la décroissance du relief avec un léger écart de 4,5°C dans tout le bassin versant de la Soummam.

La cartographie automatique de l'ETR réalisée au niveau du bassin de la Soummam montre une variation de la même manière que celle des précipitations et les valeurs varient entre 221mm à 632mm.

Concernant la grille finale, la carte des écoulements traduit bien les contrastes hydrologiques très marqués, l'écoulement varie de 400 à 2mm du Nord-Est au Sud-Ouest.

CONCLUSION GENERALE

L'Algérie dispose en fin de compte d'importantes ressources en eaux, malheureusement mal exploitées. Ceci est dû d'une part au manque d'infrastructures (barrages) pour retenir cette eau et d'autre part à l'insuffisance de dispositif de mesure qui permettra une meilleure connaissance de cette ressource en eau. En plus de ces facteurs, le manque de moyens mis à la disposition de la recherche et la gestion inappropriée des ressources ont accru le problème du manque d'eau.

La croissance démographique et le développement socio-économique des populations se sont traduits par un accroissement des besoins en eau, engendrant ainsi une pression sur les capacités hydriques du bassin.

Il est devenu évident que les nappes phréatiques sont souvent surexploitées et polluées et que les déviations de cours d'eau et les incertitudes quant à la quantité d'eau disponible menacent la croissance économique et l'environnement.

Avec un climat méditerranéen sub humide vers le Nord et un climat semi aride vers le Sud, le bassin de la Soummam est doté d'importantes ressources en eau mais inégalement réparties dans le temps et dans l'espace.

Les paramètres physiographiques de notre bassin d'étude montrent que les sous bassins versants de la Soummam présentent une forme assez allongée dans l'ensemble ($1,37 < Kc < 1,95$). La densité de drainage varie d'un sous bassin à un autre, Les altitudes qui sont dans l'ensemble moyennes à faibles reflètent un relief modéré, elles sont comprises entre 2 à 2150 m. Ce qui renseigne sur la vitesse des écoulements qui serait moyenne.

Les potentialités en eau du bassin sont évaluées à 837Hm^3 , dont 684Hm^3 pour les eaux superficielles et 153Hm^3 pour les eaux souterraines.

Le volume mobilisé au niveau des quatre barrages de la Soummam est de 314Hm^3 . En tenant compte de la capacité des retenues collinaires, en nombre de 73, qui est de l'ordre de $12,4 \text{Hm}^3$. Le volume des forages en exploitation est de $179.30 \text{Hm}^3/\text{an}$.

La qualité des eaux superficielles et souterraines dans le bassin ne cesse de diminuer. Cette dégradation, menace la pérennité de la ressource en eau, si des actions d'envergure ne sont pas entreprises pour la réhabilitation des stations d'épuration existantes, la création de nouvelles stations et la mise en place de systèmes de gestion adéquats.

Nos ressources en eau subissent de nombreuses pressions. Il nous faut encore acquérir davantage d'informations fiables sur la qualité et la quantité d'eau disponible ainsi que sur la manière dont cette disponibilité varie dans le temps et d'un endroit à l'autre.

Dans ce travail, nous avons procédé à l'analyse détaillée des paramètres hydropluviométriques. Rassembler, critiquer, analyser et synthétiser les données de base, s'est avérée nécessaire pour analyser l'influence des caractéristiques physiques sur la répartition et l'évolution spatio-temporelle des écoulements superficiels.

C'est une opération longue parce que l'information nécessaire est difficile à collecter et à mettre en forme quand elle est disponible et nécessite plusieurs vérifications, contrôle et

traitements avant d'être validée, et délicate car cette information est quelques fois lacunaire ou de courte durée d'observation, quelques fois hétérogènes ou entachée d'erreurs.

L'ajustement graphique des séries pluviométriques des différentes stations du bassin de la Soummam pour la période (1968/2004) s'ajustent en général à une loi racine normale de Gauss.

La pluviométrie moyenne interannuelle obtenue par l'analyse des séries chronologiques de pluie pour les 35 stations du bassin versant de la Soummam et sa périphérique est de 429mm, soit un taux de précipitations de 40 %. Les pluies annuelles sont caractérisées par un régime pluviométrique très variable d'une année à l'autre traduisant ainsi une nette irrégularité.

L'évolution des précipitations moyennes interannuelles montre une alternance des années humides et des années sèches. L'année la plus sèche est enregistrée en 2001 avec un minimum de 244,5 mm. L'année 2002 est la plus arrosée qui totalise un maximum de 685,3 mm.

La répartition mensuelle interannuelle des précipitations montre une saison des hautes eaux qui s'étale du mois d'octobre jusqu'au mois de mai en totalisant plus de 88% de la lame d'eau annuelle, et une saison d'été nettement sèche du mois de juin à septembre avec seulement 12% des précipitations. En effet, le maximum est enregistré essentiellement en décembre de 65 mm et le minimum est observé au mois de juillet de 4,7 mm.

Le régime thermique est caractérisé par des températures moyennes annuelles comprises entre 4.4° et 26.6°C.

L'évapotranspiration est quantifiée par l'application de diverses formules empiriques. La moyenne de l'ETP au niveau des quatre stations du bassin de la Soummam est de 859 mm et celle de l'ETR est de l'ordre de 422mm, soit 85% des précipitations.

Le calcul du bilan hydrique permet de faire les constatations suivantes :

- La pluie ne permet pas un stockage permanent de l'eau dans le sol, ce qui induit un déficit agricole plus ou moins long. Ainsi, la saturation de la RFU, pour une année moyenne, ne dure que 03 mois de décembre (janvier au niveau de la station de Bouira) à février pour la station de Béjaïa ;
- Cette situation induit un déficit agricole pendant 05 mois : de juin (mai à Bouira) à octobre pour la station de Béjaïa. Par contre le déficit s'observe respectivement du mois d'avril à octobre et mars à novembre aux stations de Sétif et BBA. Les sols agricoles demandent donc une irrigation par les eaux de surface, qui vont produire une recharge supplémentaire de la nappe.

L'analyse des débits moyens annuels montre une irrégularité interannuelle très marquée. Les lames d'eau écoulées varient énormément d'une année à une autre. Les fortes valeurs sont enregistrées à la station de Sidi Aïch avec un maximum de 50,73 m³/s.

Le ruissellement représente quant à lui 14 % des précipitations, soit une lame d'eau moyenne annuelle de 68mm. L'infiltration ne laisse percoler que 63 mm, ce qui ne représente que 13% des précipitations. Ceci laisse penser que l'alimentation de la nappe ne se fait pas exclusivement à l'aide de l'infiltration efficace.

La représentation cartographique a été également utilisée pour permettre au lecteur d'avoir une vue d'ensemble de la distribution spatiale des paramètres hydrologiques, et de faciliter les comparaisons nécessaires.

L'examen de toutes les cartes réalisées, permet de faire ressortir une répartition des zones en bandes de couleurs du Nord-Est au Sud-Ouest.

Dans notre zone d'étude, nous pouvons conclure que, les précipitations changent dans l'espace d'étude beaucoup plus avec l'effet de la latitude où les valeurs sont nettement plus élevées, cela indique sur l'importance de l'effet des autres composantes du milieu sur les précipitations.

Les pluies sont moins importantes à mesure que l'on s'éloigne du littoral à cause de l'appauvrissement progressif de l'atmosphère en vapeur d'eau, lors du passage des courants aériens qui abandonnent leurs pluies en franchissant les chaînes montagneuses. Le partage de l'année hydrologique est bien vérifié à travers le comportement pluviométrique durant les différents mois où les pluies sont plus arrosées en hivers.

La variance spatiale des températures s'explique par des variables connues : la position et l'altitude, elles augmentent avec la décroissance du relief avec un léger écart de 5°C dans tout le bassin versant de la Soummam.

La cartographie automatique de l'ETR réalisée au niveau du bassin d'étude montre une variation de la même manière que celle des précipitations.

L'évolution de l'évapotranspiration et de la température accentue le phénomène de l'évapotranspiration, le tarissement des cours d'eau et l'assèchement rapide des sols et ceci influe négativement sur la disponibilité des ressources en eau dans le bassin.

Concernant la grille finale, la carte des écoulements traduit bien les contrastes hydrologiques très marqués, on constate une large variabilité spatiale sur l'ensemble du bassin Les écoulements moyennes annuelles se chiffrent parfois à plus de 400 mm dans les zones montagneuses du Nord-Est au Sud-Ouest.

Pour de nombreuses opérations géographiques, la finalité consiste à bien visualiser des cartes et des graphes. Une carte vaut mieux qu'un long discours. La carte est en effet un formidable outil de synthèse et de présentation de l'information.

Vécue pendant très longtemps comme un 'don de Dieu' et une ressource inépuisable, l'eau accède aujourd'hui au statut de 'bien rare' qu'il faut gérer en sensibilisant ses principaux utilisateurs.

Références bibliographiques

- ABH, (2003) — Les Cahiers de l'Agence, Agence de Bassin Hydrographique. Algérois-Hodna-Soummam.
- ACHITE M., TOUAIBIA B., (2007) — Sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant de la Mina, Algérie. 2^{ème} *Colloque International sur l'eau et l'Environnement. ENSH Sidi.fredj. Proceeding, 1-6. 30 & 31 Janv.* pp. 1-12.
- AISSANI B., (1983) — Cartographie automatique de champs pluviométriques : exemple de la région Algéroise. *Science de la Terre.* 292 p. 2-553-01151-2,320 p.
- ANRH, (1974) — Hydrologie des nappes alluviales de l'Oued Soummam.
- ANRH, (2002) — Notice explicative de la carte des évapotranspirations potentielles du Nord de l'Algérie au 1 : 500 000. *Projet de coopération Algéro - Allemande. N° 9 21 835.* 42 p.
- ANRH,(2005)—Données pluviométriques 1968-2004 et géomorphologiques du bassin de la Soummam.
- ArcMap et ArcCatalog, (2004) — SIG 2004.
- ARNAUD M., EMERY X., (2000) — Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. *Paris : Hermès,* 221 p.
- ASSABA M., LABORDE J-P., (2000) — La prise en compte du relief dans l'estimation des pluies mensuelles : le cas de la Corse. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie, vol. 13,* pp. 149-157.
- BATTI A., (2005) — Spatialisation des pluies extrêmes et cartographie de l'aléa «érosion des sols » dans les bassins versants en amont du lagon Saint Gilles (Île de la Réunion). *Rapport,* 55 p.
- BELGAID N., (1997) — Approche des paramètres hydroclimatologiques : application au bassin versant de la Soummam. *Mémoire d'ingénieur, IST-USTHB.*
- BEN BRINIS S., TAMOUZA.F., (2004) — Elaboration du cadastre hydraulique à l'échelle du bassin versant de la Soummam. *Mémoire d'ingénieur, FGN-USTHB.*
- BENICHOU P. et LE BRETON O., (1987) — Prise en compte de la topographie pour la cartographie des champs pluviométriques statistiques : la méthode Aurelhy. *Agrométéorologie des régions de moyennes montagnes. Coll. I.N.RA.N°39, Paris,* pp.51-68.
- BOIS Ph., (1971) — Une méthode de contrôle de séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie. *Publication du Laboratoire de Mécanique des Fluides : Université de Grenoble.*30 p.
- BOIS Ph., (nd) — Contrôle de séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus de la corrélation. *Chercheur à l'Institut de Mécanique de Grenoble (IMG),* 99 p.

- BOUANANI A., (nd) — Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie). *Thèse doctorat d'état en Géologie appliquée*, 255 p.
- BOUILLIN P., DURAND-DELGA M., GELARD J-P., LEIKINE M., RAOULT J-F., RAYMOND D., TEFIANI M., VILA J-M., (1973) — Les olistostromes d'âge miocène inférieur liés aux flyschs allochtones kabyles de l'orogène alpin d'Algérie. *Bull. de la Soc. Géol. de France*, 15 (3-4): 340-344.
- BOUVIER C., (1994) — Sur la pratique des modèles numériques de terrain (MNT) en hydrologie. L'expérience des bassins de Chalco (Mexique). *Hydrol. Continent.*, vol .9. n°1. pp.5-16.
- BRAVARD J-P., PETIT F., (1991) — Les cours d'eau (dynamique du système fluvial). *Collection Armand Collin. Ed. Masson.* 147 p.
- BREMOND J., (2007) — Le cycle de l'eau. ; Cours d'hydrogéologie, M1 SVT 2006 - 2007. BRUNET-MORET Y., (1971) — Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. *Cah. O.R.S.T.O.M., Sér. Hydrol.*, vol. VIII, n° 4, 31 p.
- CARREGA P., DUBREUIL V., RICHARD Y., (2004) — Climatologie et développement durable. *In Revue Hist. et Géographie*, n°387, juillet. Vers une géographie du développement durable. pp.205-209.
- CASTANY G., (1963)— *Traité pratique des eaux souterraines.* Dunod *Edition Paris*, 641 p.
- CASTANY G., (1982) — Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Dunod. Paris*, 236 p.
- CATE, (2000) — L'eau en Algérie: le grand défi de demain. *Journée: rencontre-débats 5 Mars 2000.*
- CERNESSON F., MÜLLER J-P., (2000) — Méthodes d'analyse spatiale et de modélisation spatio-temporelle. *Information spatiale pour l'environnement et les territoires. Cemagref 2000*, pp.17-25.
- CHARLEUX-DEMARGNE J., (2001) — Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants. *Thèse préparée au sein de l'unité mixte de recherche « Structures et systèmes spatiaux » Cemagref-Engref, Montpellier*, 350 p.
- CHAUMONT M., PAQUIN C., (1971) — Carte pluviométrique de l'Algérie, échelle 1/50000. *Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord, Alger*. 4 feuilles. 1 notice.
- CHEMLAL N., (1983) — Etude paléomorphologique et hydrogéologique de la vallée du bas Isser (Algérie). *Thèse doctorat de 3^{ème} Cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble*, 213 p.
- CLINCKX C., (1973) — Etude hydrogéologique de la nappe alluviale de la basse Soummam (Sidi Aïch - Béjaïa), N°74.HYG.02.RS, *DEMRH Alger*, 80p.
- CORNET Y., FITSCHY C., GOBBATO O., ERPICUM M., (2005)—Modélisation de la distribution spatiale des précipitations en Sicile. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 46 2005, p.11-26.

- COSANDEY C., (1994) — Formation des crues «cévenoles» dans des bassins élémentaires du Mont Lozère. *Revue des sciences de l'eau : Journal of Water Science, Volume 7, Numéro 4*, pp. 377-393.
- COUTELLE A., (1976) — Grands traits stratigraphiques et structuraux du Djurdjura, *in bulletin. Soc. Hist. T67 fsc1-2*, 215 p.
- COUTELLE A., (1982) — Etude géologique du Sud-Est de la grande Kabylie et des Babors d'Akbou. *Université de Brest*. 558 p.
- CUN C., (2003) — L' eau ? Un produit naturel méconnu. *Article du Centre de recherche d'Expertise et de contrôle des eaux de Paris (CRECEP), Paris, 24 juin*.
- DABOUZ Y., (2007) — Cartographie des pluies sur le bassin versant de la Soummam. Mémoire d'ingénieur FGN-USTHB.
- DAGNELIE P., (1973) — Théorie et méthodes statistiques. *Les presses agronomiques, Gembloux, Vol1*.378 p.
- DAVTIAN G., (1998) — Analyse des données et cartographie automatique : application aux principales variables climatiques du versant méditerranéen du Maghreb, *Thèse de doctorat , Université de Nice-Sophia Antipolis*, 328 p.
- DEHNI A., (1999) — Etude des gradients pluviométriques dans le Nord Ouest Algérien. *Mémoire d'ingénieur, DGAT-USTHB*.
- DETAY M., (1997) — La gestion active des aquifères. *Edition Masson, Paris*, 416 p.
- DRAPEAU L., (2000) — Statistiques et interpolations dans le SIG. Towards the use of Geographic Information Systems as a decision support tool for the management of Mediterranean fisheries. Informations et études – COPEMED.
- DUBREUIL P.L., (1974)—Initiation à l'analyse hydrologique. *Ed.Masson et Cie ORSTOM,Paris*, 216p.
- DUBREUIL P.L., (1989) — Pour un suivi à long terme de l'évolution des ressources en eau grâce à un réseau européen de bassins de référence. *Hydrologie, 2* 111-114.
- DURAND DELGA M., (1969) — Mise au point sur la structure du NE de la berbérie. *In Bull.Serv. Géol de l'Algérie, N°39.Alger*, pp. 90-131.
- Encyclopédie, (2004) — Encarta
- ENERGOPROJEKT-E.N.HYD., (1990) — Etude de l'aménagement hydro agricole de la plaine d'El Tarf : analyse des ressources en eau, AGID, Alger.
- ESRI France, (2004) — <http://www.esrifrance.fr/sig3.asp>.
- FAO, (1997) — Irrigation in Africa in figures : L'irrigation en Afrique en chiffre. (350 p, Rome).
- FAO,(2005) — http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/algeria/indexfra.stm
- FICHEUR A., (1891) — Stratigraphie, descriptions régionales 2ème série, n° 01 : la Kabylie du Djurdjura. *Alger*, 407 p.
- FLANDRIN J. (1948) — Contribution à l'étude du Nummulitique Algérien, 2^{ème} série stratigraphie n°19, *Alger*, 334 p.
- GHACHI A., (1986) — Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie : le bassin de la Seybouse, *Alger, O.P.U.*, 508 p.

- GHARZOULI R., DJELLOULI Y., (2005) — The floristic diversity of the Babors forestlands (Algeria). *Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 16, Number 3, 217-23.*
- GILLIOT J-M., (2000) — Introduction aux systèmes d'informations géographiques. *DAA AGER*.pp. 61-139.
- GIRARD S., PATUREL J-E., MAHE G., OUATTARA F., CRES A., (2002) — Spatialisation des pluies au Burkina Faso : impact de la méthode et de la source de données. *Sud sciences et technologies. N° 9 – Déc.* pp. 17-24.
- GLEICK P. H., (1996) — Water resources in Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider, Oxford *University Press, New York, vol. 2,* pp. 817-823.
- GOUAIDIA L., (2008) — Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana. Nord-Est Algérien. *Thèse de doctorat d'état,* 360 p.
- HABERT E., (2000) — Qu'est ce qu'un système d'information géographique? *Rapport IRD.* 13 p.
- HADJ-SAID S., (2007) — Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière: cas de la nappe de Guerbes. *Thèse de doctorat (hydrogéologie),* 188 p.
- HADJOU F., (2008) — Etude hydrogéologique par modélisation mathématique en vue d'une approche rationnelle et optimale de la gestion des eaux souterraines de la vallée de l'Oued Sebaou. *Mémoire de magister, IST-USTHB.* 178 p.
- HAMENNI.N., (1997) — Etude hydroclimatique du bassin versant de la Soummam – Sétif . *Actes 1^{ères} journées scientifiques. INRA. Algérie*pp. 6-10.
- HEITZINGER D., (1998) — Knowledge-based 3D surface reconstruction. *Vienna University of Technology, Austria.*
- HELLAL O., TAZKRAT T., (1993) — Essai d'approche par modélisation des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale de la Haute Soummam. *Mémoire d'ingénieur, IST-USTHB.*
- HOCINE F., BELHADJ AISSA M., BELHADJ AISSA A., HADDOUD A., (2007) — Extraction du réseau hydrologique à partir d'un MNT et utilisation du SIG pour l'étude du bassin versant. *Acte des JSIRAUF, Hanoi, 6-9 nov.*
- HUBERT P., BENDJOUDI H., (1996) — Introduction à l'étude des longues séries pluviométriques. *XII^{èmes} Journées hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, 10-11 oct.* 16 p.
- HUMBERT J., (1995) — Cartographie automatique des précipitations mensuelles et annuelles en zone montagneuse. *Annales de Géographie. Vol.104. N° 581-582.* pp. 168-173.
- INSTITUT AGRONOMIQUE ET VETERINAIRE HASSAN II., (1998) — Gestion de la contrainte pluviométrique pour l'amélioration de la production végétale et de l'efficacité d'utilisation de l'eau. *Bulletin de liaison du Programme National de transfert de technologie en agriculture.*

- I.A.A.T, (2003) — Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG, 33p.
www.iaat.org/telechargement/ sig .pdf .
- JEMALI A., KEFATI A., (2002) — Réutilisation des eaux usées au Maroc.*Forum sur la gestion de la demande en eau*,33 p.
- KADI A., (1997)— La gestion de l'eau en Algérie. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42(2) April.
- KAMED A., (2002) — Distribution spatiale des précipitations par le système d'information géographique: application à la région de Sétif (Soummam). *Mémoire d'ingénieur ENP (Algérie)*. p 98.
- KERDOUN A., (1998) — Education et sensibilisation en vue d'une protection de l'eau en Algérie.
Congres International de Kaslik-Liban-18-20 Juin. 11p.
- KESSASRA F., (2006) — Etude hydrogéologique sous l'aspect de la modélisation mathématique en vue d'une gestion rationnelle des écoulements souterrains de la vallée de la Soummam. *Mémoire de magister, IST-USTHB*. 173 p.
- KEZOUH S., (2007) — Cartographie de quelques paramètres climatiques dans le centre de l'Algérie du Nord : application agronomiques. *Mémoire d'ingénieur en science du sol, ENSA*.
- KHELFAOUI F., ZOUINI D., (2010)—Gestion intégrée et qualité des eaux dans le bassin versant du Saf-Saf (wilaya de Skikda, Nord-Est Algérien). *Revue « Nature et Technologie »*. N° 03/Juin. p.50-56.
- KHERRAZ K., (nd) — Gestion intégrée des ressources en eau en Algérie principes et moyens d'une nouvelle politique. A.B.H : Constantinois-Seybousse-Mellegue. <http://www.oieau.fr/ciedd/contributions/at3/contribution/kherraz.htm>
- KRAVCHENKO A., ZHANG R., TUNG Y-K., (1996-2004) — Estimation of mean annual precipitation in Woming using geostatistical analysis. pp. 1-12.
- LABORDE J-P., (1997) — Les différentes étapes d'une cartographie automatique : exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 8, pp. 37-46.
- LABORDE J-P., (1998) — Méthodes de détection des anomalies et de comblement des lacunes dans les séries de données, à l'usage des climatologues et de quelques autres - *Université de Nice Sophia Antipolis*, 25 p.
- LABORDE J-P., (1998) —Notice d'utilisation du logiciel hydrolab, *Université de Nice Sophia Antipolis*, 43 p.
- LABORDE J-P., (2000) — Eléments d'hydrologie de surface. *Cours Université de Nice Sophia Antipolis*, 192 p.
- LABORDE J-P., (2000b)—Hydrolab. *Logiciel de traitement statistique des données hydrologiques*.
- LAISSAOUI M., (2008) — Etude hydrogéologique par modélisation mathématique pour une gestion rationnelle des eaux souterraines du bas et moyen Isser (wilaya de Boumerdès), *Mémoire de magister*, 138p.

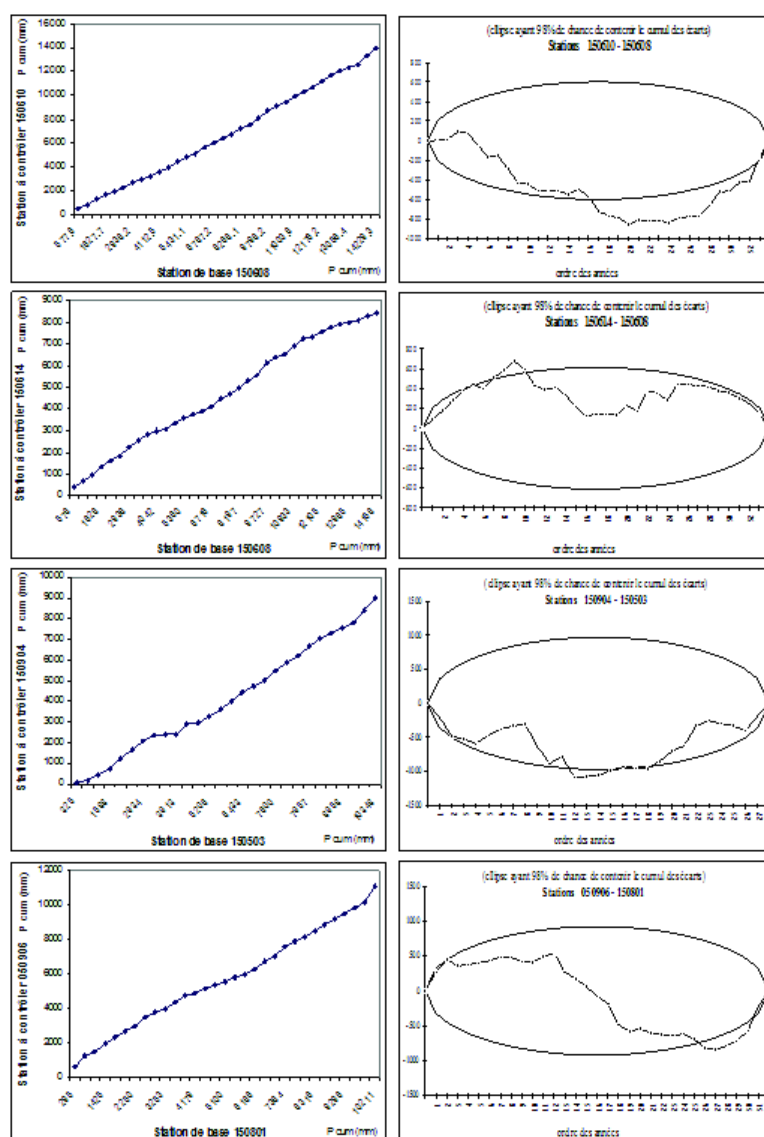
- LANDRY J-A., (2005) — Système d'information géographique et télédétection. *Cours d'introduction aux SIG. SYS86*. [http:// www.gpa.etsmtl.ca/cours/sys866](http://www.gpa.etsmtl.ca/cours/sys866) .
- LAVIGNE F., MAGDELAINE C., (2001) — http://www.notre-planete.info/geographie/outils/sig_0.php.
- LEIKINE M., (1971) — Etude géologique des Babor occidentaux (Algérie). *Thèse de Doctorat en Sciences Naturelles. Faculté des Sciences de l'Université de Paris*. 536 p.
- LIBBEY J., (2003) — Le fonctionnement hydroclimatique de la cuvette lacustre de Maharlou (Iran). *Scie nce et changements planét air e s / Sécheresse . Volume 14 , Numéro 4, 219-26, Oct–Nov - Déc .*
- MEBARKI A., (1982) — Le bassin du Kébir-Rhumel (Algérie). Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau. *Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Nancy II*, 304 p.
- MEBARKI A., (2005) — Hydrologie des bassins de l'est Algérien : ressources en eau, aménagement et environnement. *Thèse de doctorat d'état*, 360 p.
- MEDDI H., MEDDI M., MAHR N., HUMBERT J., (2007) — Quantification des précipitations: application au Nord Ouest de l'Algérie - la méthode Pluvia. *Geographia Technica, N°1,62* p.
- MENDIETA C., (2005) — L'économie des ressources en eau : de l'internalisation des externalités à la gestion intégrée, l'exemple du bassin versant de l'Audomarois. *Thèse de Docteur en sciences économiques*, 345 p.
- MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, (1990) — Stratégies de la gestion des eaux dans le bassin Méditerranéen. *Actes de la conférence ministérielle Horizon 2010. Alger*.
- MRE-BCEOM-BG-SOGREAH., (2004) — Etude d'actualisation et de finalisation du Plan National de l'Eau *volet 4 et 6*.
- MOTI M., (1997) — Cartographie par informatique des carbonates de la vallée de l'Artibonite (Haïti). *Mémoire de fin d'études. Université Laval, Québec*, 81 p.
- MOUKOLO N., (1984) — Ressources en eau souterraine et approvisionnement. Essai d'analyse socio-économique en région équatoriale humide (régions de Brazzaville et Pointe-Noire, Congo). *Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Montpellier*.
- MUSY A., (2005) — Cours d'hydrologie générale. *Chapitres 1 et 2* .
- MUSY A., LAGLAINE V., (1992) — Hydrologie générale. Cours polycopié, *EPFL, Lausanne*.
- NAAK M., (1996) — La dorsale kabyle du Djurdjura : une paléomarge de transformation et un segment du système alpino-méditerranéen. *Thèse de Magister, IST-USTHB*.
- NAAK M., MACHANE D., (2002) — Faille sismique de la Kabylie et lien avec l'archéosismologie. *Résumé n° 298 session I1*.
- OBLED C., LEHUCHER P-M., (nd) — Analyse géostatique des caractéristiques spatiales des épisodes pluvieuses intenses affectant la région Provence-Cote d'Azur-riviera Italienne, pp. 223-237.

- O.N.M, (2006) — Bulletin Mensuel d'Informations Climatologiques. Données climatiques (1968-2004). *Office national de la météorologie. Centre climatologique d'Algérie.*
- OUTEMZABET F., (1997)—Bilan hydrolclimatologique du bas-Chelif. *Mém. d'ing., FGN-USTHB.*
- P.N.E., GROUPEMENT BCEOM-BG-SOGREAH, (2004) — Etude d'actualisation et de finalisation du PNE-Centre et Est. *Mission 2-Mai 2004, Volet 4-Hydrologie.*
- RAKOTONDRABE F., (2007) — Etudes de la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques, modélisation par le logiciel WEAP 21: Cas du bassin versant de Morondava (Sud Ouest de Madagascar). *Mémoire d'ingénieur en Génie Minéral.* 87 p.
- REMENIERAS G., (1976) — L'hydrologie de l'ingénieur. *Collecte. Dir. Etudes. Rech. Electr. France. Ed., Eyrolles.* 465 p., 149 fig.
- RIAD S., (2003) — Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. *Thèse de doctorat d'état, Université des Sciences et Technologies de Lille & Université Ibnou Zohr D'agadir* 154 p.
- ROCHE M., (1963) — Hydrologie de surface. *Gauthier-Villars Editeur-Paris,* 429 p.
- ROCHE M., (nd) — L'apport de l'ORSTOM dans l'hydrologie de l'Afrique de l'Ouest. *Cah. ORSTOM. Sér. Hydrol., vol. XX, n^{OS} 3 et 4; f 983,* pp. 205-211.
- RODRIGUEZ F., (2004) — Utilisation d'un SIG pour la modélisation hydrologique des bassins versants urbains. *Fiche technique du CNIG n°76.*
- ROGNANT L., (2000) — Application à la représentation de MNT et à la fusion de MNT radar. *Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier (Grenoble).* 431 p
- ROUSSEAU F., (2006) — Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques. *Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN n°75 (1).* pp. 95-100.
- SARI AHMED A., (2002) —Initiation à l'hydrologie de surface. Edition HOUMA, Alger, 224 p.
- SELTZER P., (1946) — Le climat de l'Algérie, Alger, *Institut de Météorologie et de Physique du Globe, Carbonnel,* 219 p.
- SLIMI A., (2008) — Mouvements de terrain et ravinements dans le bassin supérieur de l'Oued Djemaa (versant sud du Djurdjura, Algérie). *Thèse de doctorat d'état,* 308 p.
- SMIDA H., ZAIRI M., TRABELSI R., BEN DHIA H., (2005) — Etude et gestion des Ressources en eau dans une région aride par le SIG : Cas de la région de Regueb - Sidi Bouzid. Tunisie. *Conférence Francophone ESRI -5 et 6 Oct.- Issy-les-Moulineaux.*
- SOUDANI K., (2006) — Quelques notions sur les méthodes de spatialisation et analyse de données. *Faculté des Sciences d'Orsay.* 7p.
- TABETAOUL M., (nd) — Les changements d'utilisation et de couvert des sols et les ressources en eau. *Association pour la Recherche sur le Climat et l'Environnement (ARCE), BP 4250, Ibn Rochd, 31037, Oran (Algérie).*

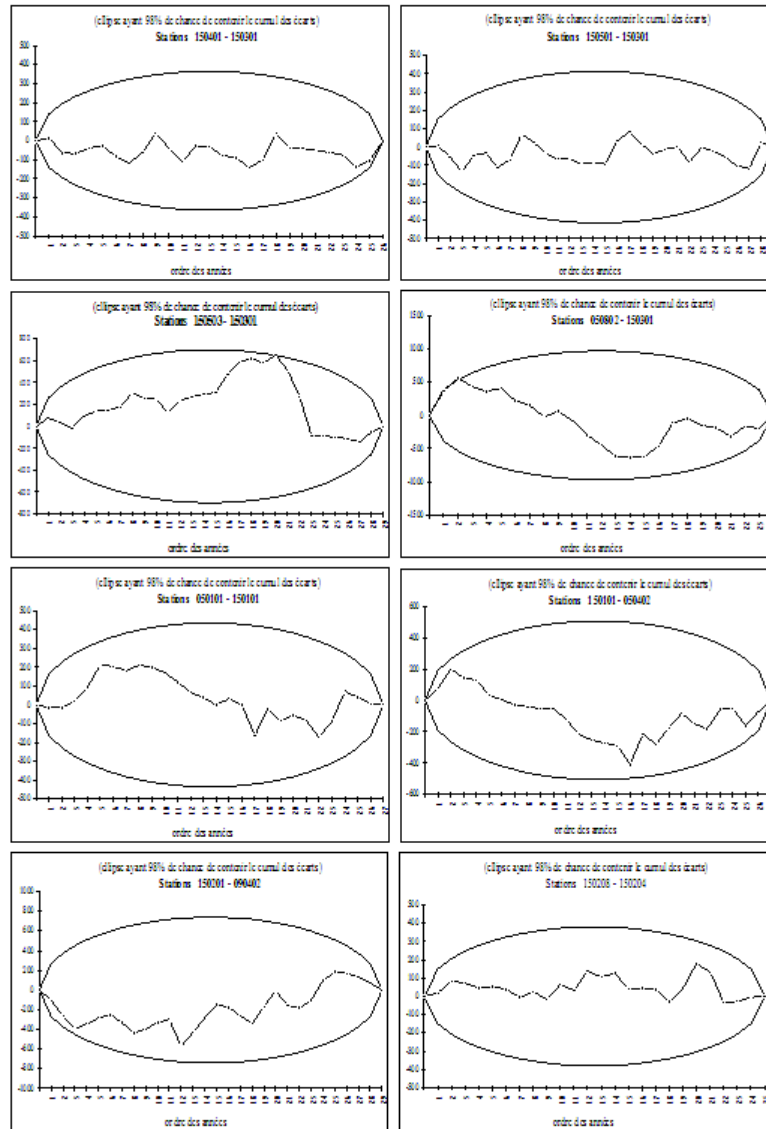
- TARRADE J-L., (1988) — Cours d'hydroclimatologie à l'intention des étudiants ingénieurs en hydrogéologie. *USTHB, Alger*.
- TEFIANI M., (1992) — Nouvelle hypothèse sur la structure de la dorsale Kabyle (Algérie) *Réunion Annuelle des Sciences de la Terre*, pp. 14-148.
- TOMA A-C., (nd) — Variabilité spatio-temporelle des champs précipitants et application aux méthodes d'estimation. *Thèse de docteur en hydrologie et hydrogéologie*.
- TORTRAT F., AUROUSSEAU P., SQUIVIDANT H., GASCUEL-ODOUX C., CORDIER M., (2005) — Modèle Numérique d'Altitude (MNA) et spatialisation des transferts de surface : utilisation de structures d'arbres reliant les exutoires de parcelles et leurs surfaces contributives.
- TOUAZI M., (2001) — Evaluation des ressources en eau et acquisition de bases de données à références spatiale et temporelle en Algérie du Nord, *Thèse de doctorat , Université de Nice-Sophia Antipolis*, 300 p.
- TOUAZI M., LABORDE J-P., (2004) — Modélisation pluie-débit à l'échelle annuelle en Algérie du Nord. *Rev. Sci. Eau* 17. pp. 503-516.
- TOUCHEBEUF DE LUSSIGNY P., (1971) — Régressions et corrélations multiples en hydrologie. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie , 8 (4), ISSN 0008-0381*. pp. 33-62.
- ZERROUROU M., (1990) — Contribution à l'étude hydrogéologique de la P.A de la basse Soummam. *Mémoire d'ingénieur, IST-USTHB*.

ANNEXES

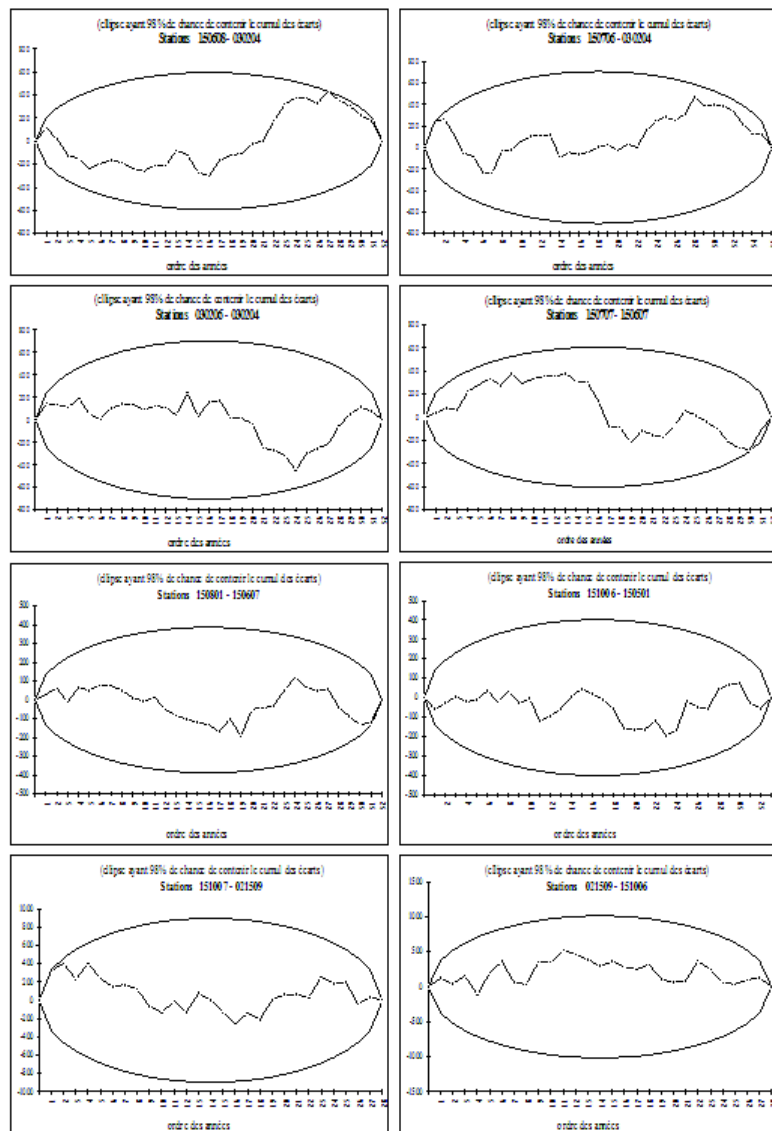
Annexe 1: Détection des anomalies systématiques et critique des données pluviométriques par la méthode des doubles cumuls (Stations Hétérogènes).



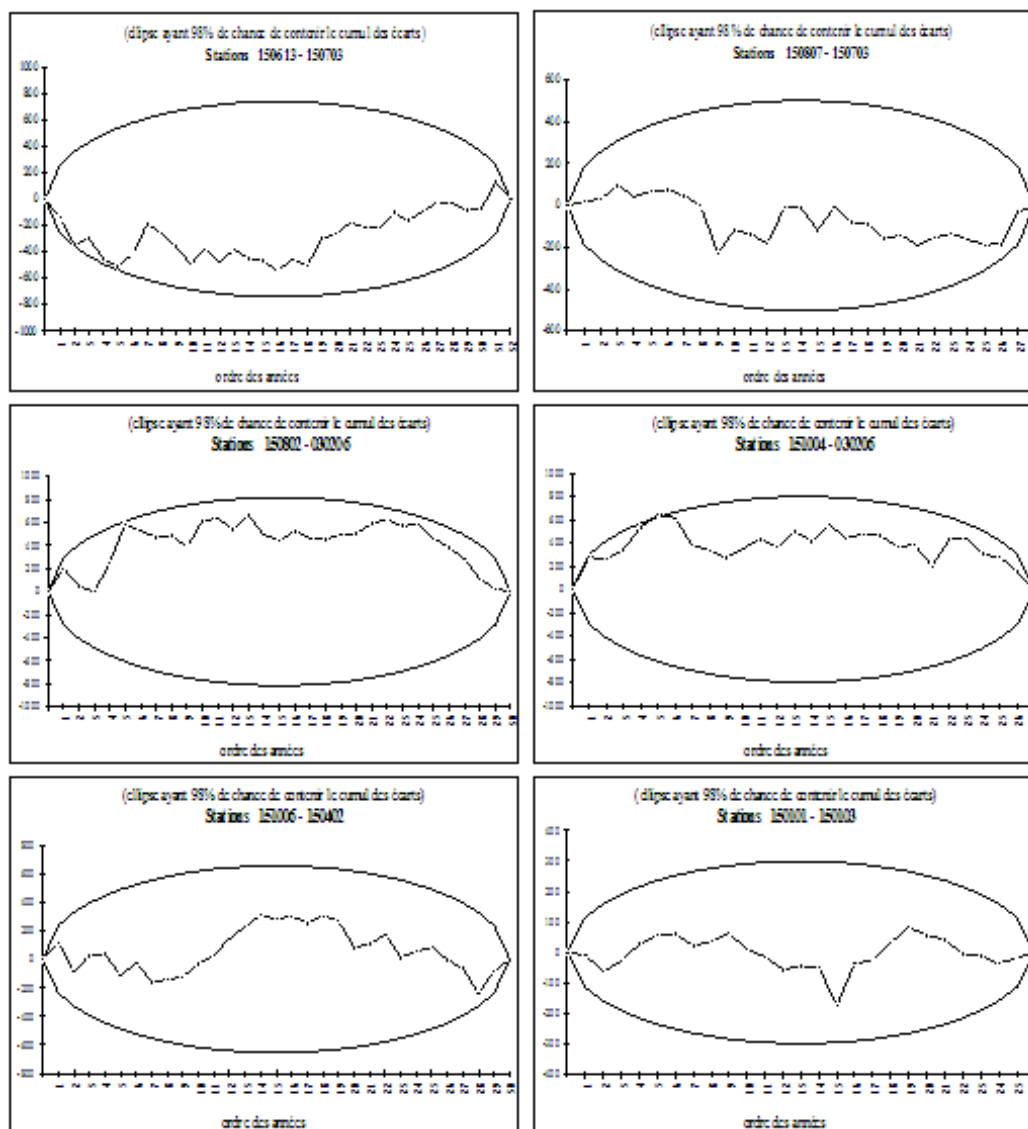
Annexe 2-1 : Détection des anomalies systématiques des valeurs à tester par rapport à la valeur de référence(Stations Homogènes).



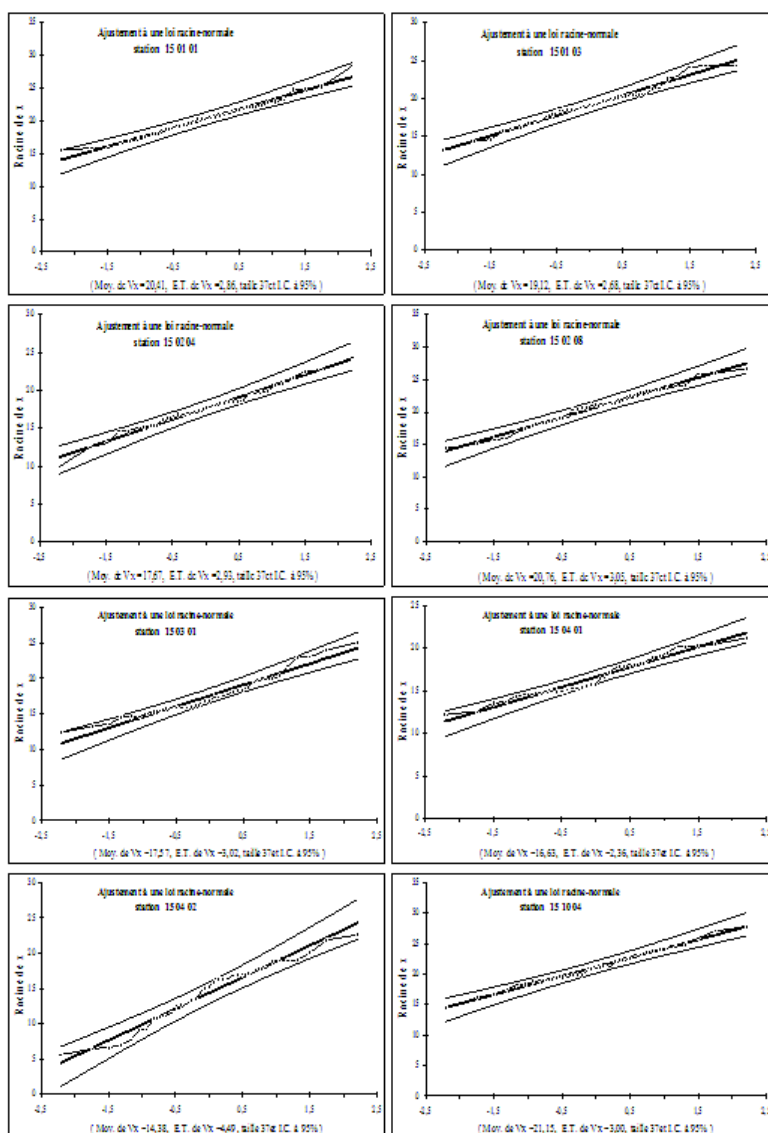
Annexe 2-2 : Détection des anomalies systématiques des valeurs à tester par rapport à la valeur de référence(Stations Homogènes).



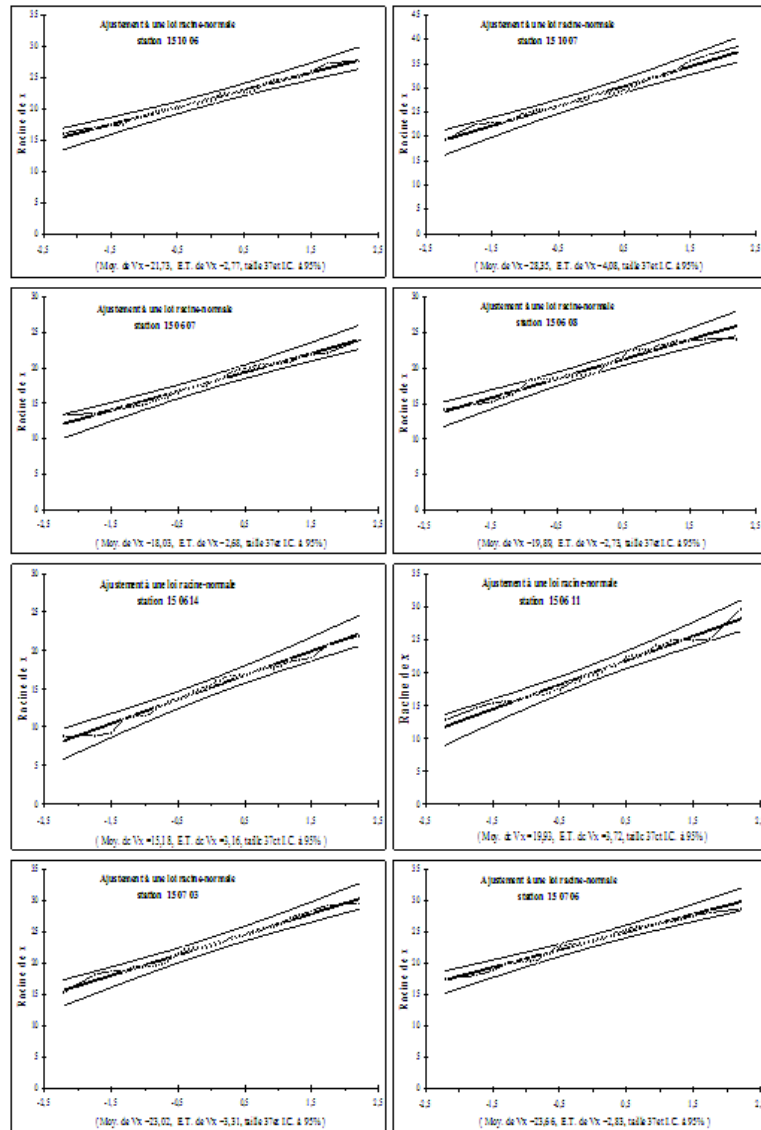
Annexe 2-3 : Détection des anomalies systématiques des valeurs à tester par rapport à la valeur de référence (Stations Homogènes).



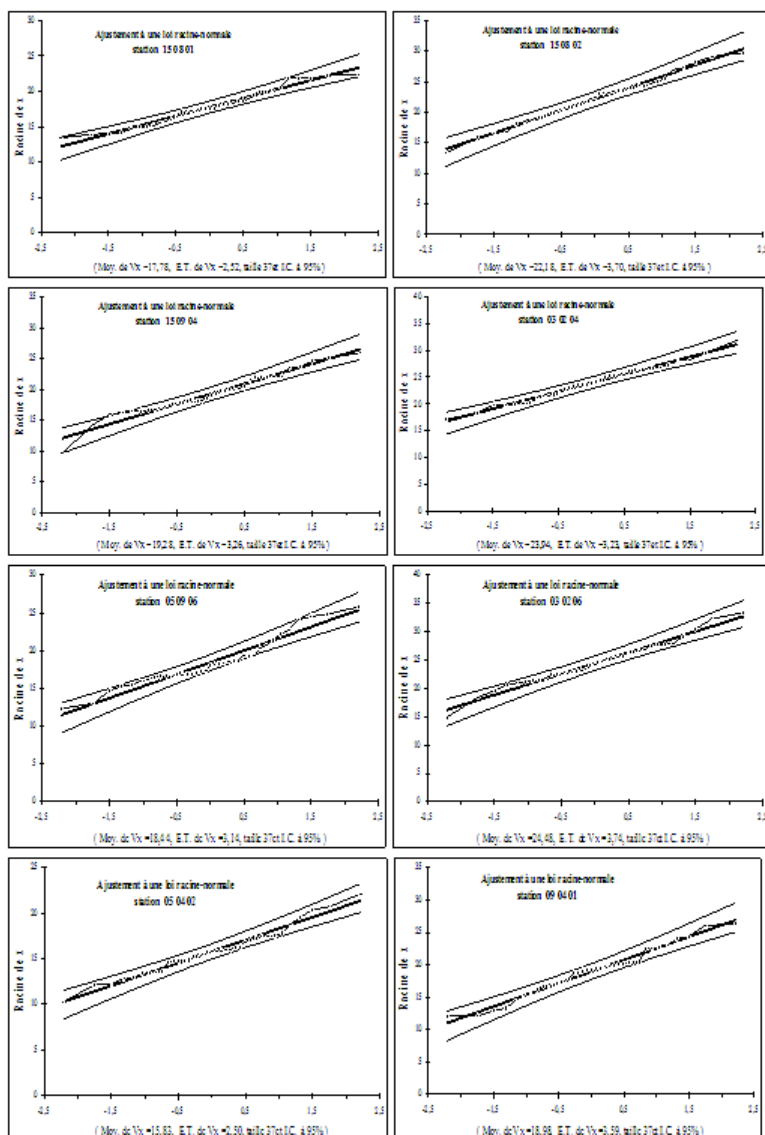
Annexe 3-1 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Racine normale (1968 - 2004)



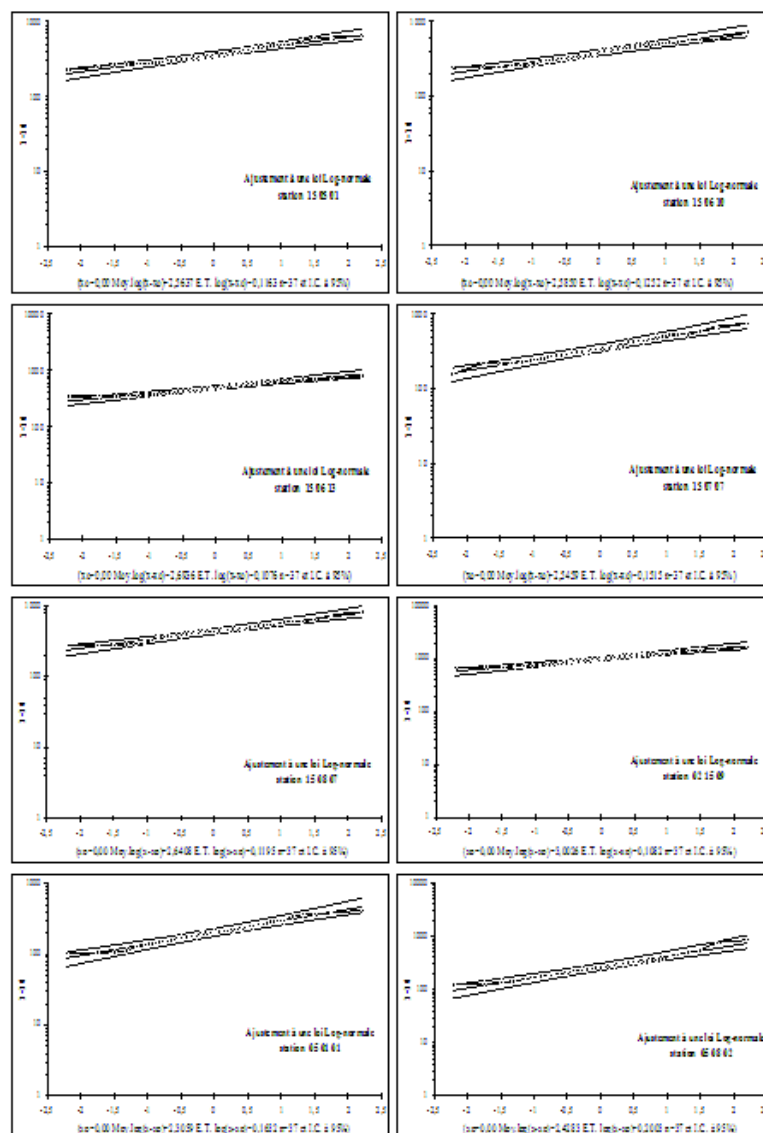
Annexe 3-2 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Racine normale (1968 - 2004)



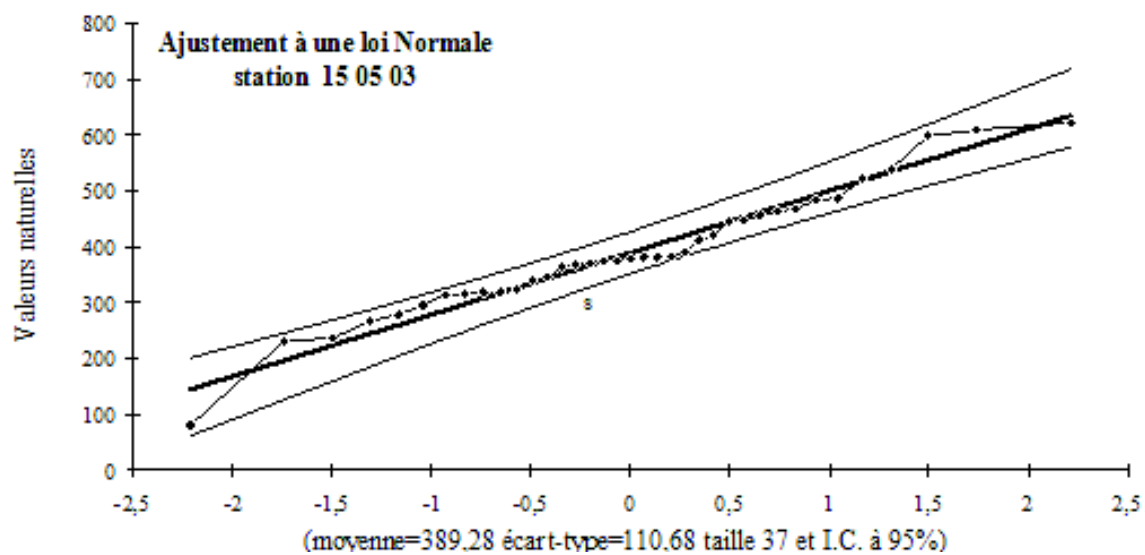
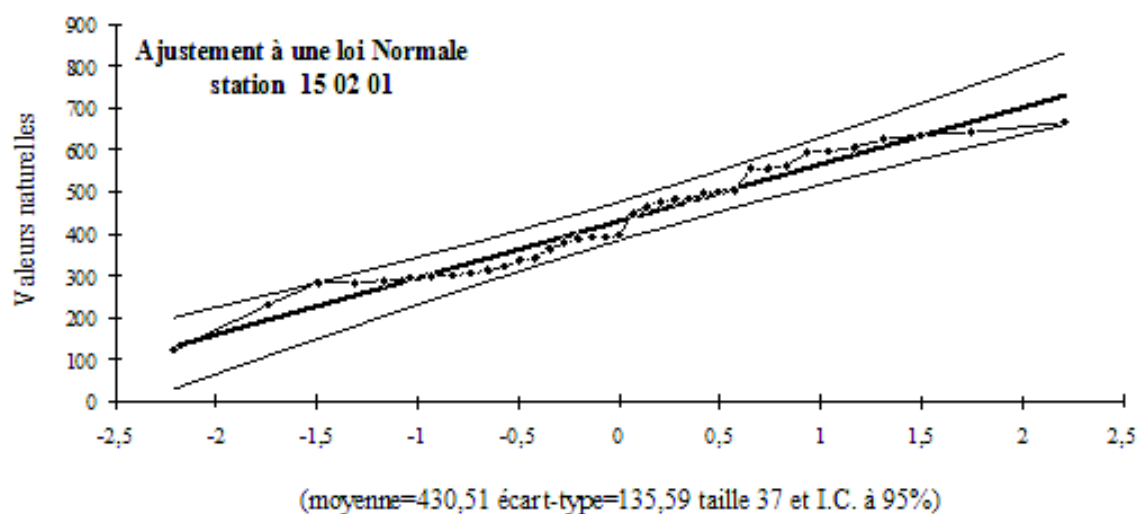
Annexe 3-3 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Racine normale (1968 - 2004)



Annexe 4 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Log normale (1968 - 2004)



Annexe 5 : Ajustement des précipitations annuelles à une loi Normale (1968 - 2004)



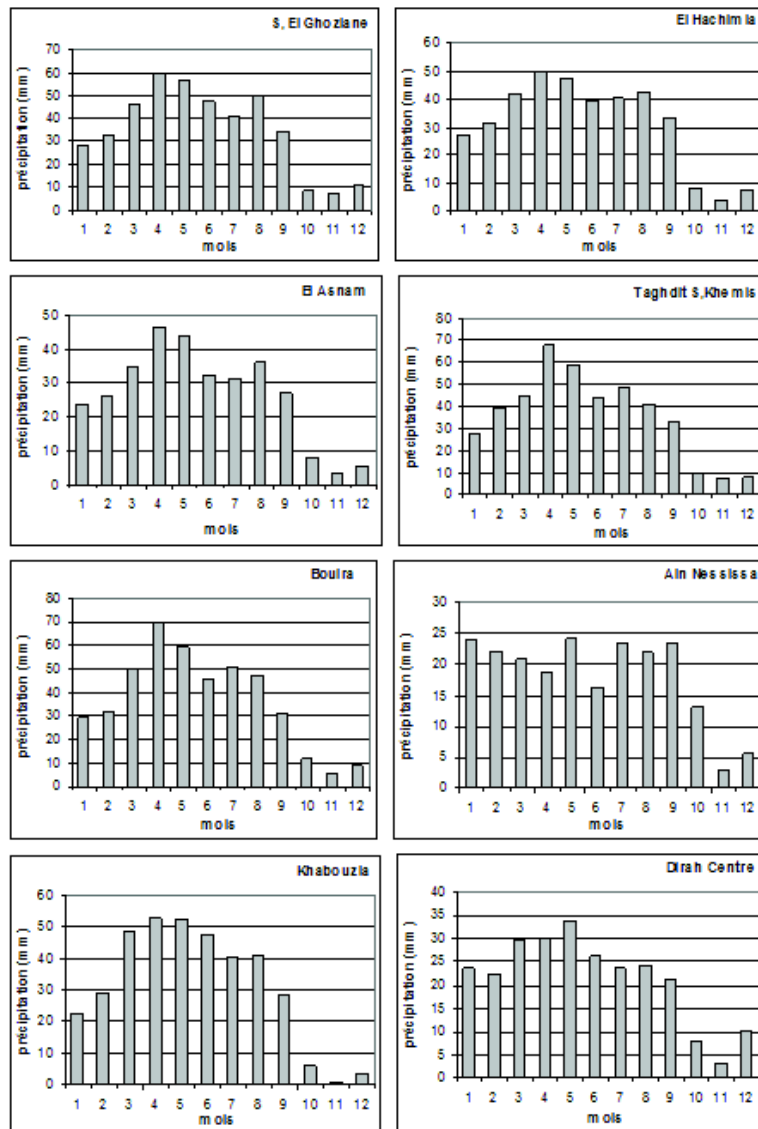
Annexe 6 : Moyennes annuelles cumulées des hauteurs de pluies (stations hétérogènes).

année	15 06 10		15 06 11		15 06 14		15 09 04		05 09 06	
	P (mm)	P. cum	P (mm)	P. cum	P (mm)	P. cum	P (mm)	P. cum	P (mm)	P. cum
1968	—	—	—	—	—	—	—	—	602,6	—
1969	533,7	—	884,7	—	423,5	—	—	—	653,3	602,6
1970	305,5	533,7	627,7	884,7	255,6	423,5	—	—	241,6	1255,9
1971	429,1	839,2	508,3	1512,4	312,7	679,1	—	—	456,3	1497,5
1972	410,8	1268,3	829,3	2020,7	355,5	991,8	—	—	374,4	1953,8
1973	244,5	1679,1	273,2	2850,0	276,3	1347,3	—	—	380,8	2328,2
1974	302,8	1923,6	121,8	3123,2	214,6	1623,6	93,2	—	276,8	2709,0
1975	495,8	2226,4	436,6	3245,0	410,9	1838,2	93,2	93,2	516,8	2985,8
1976	244,9	2722,2	618,1	3681,6	306,2	2249,1	278,8	186,4	282,1	3502,6
1977	228,6	2967,1	272,7	4299,7	270,7	2555,3	272,6	465,2	234,5	3784,7
1978	399,8	3195,7	212,6	4572,4	165,5	2826,0	492,3	737,8	335,0	4019,2
1979	335,2	3595,5	320,8	4785,0	84,4	2991,5	443,3	1230,1	375,9	4354,2
1980	530,5	3930,7	235,3	5105,8	290,0	3075,8	393,1	1673,4	168,9	4730,1
1981	344,7	4461,2	242,2	5341,1	229,4	3365,8	321,0	2066,5	277,1	4899,0
1982	319,2	4805,9	379,4	5583,3	130,1	3595,2	6,1	2387,5	161,8	5176,1
1983	523,0	5125,1	298,4	5962,7	173,8	3725,3	25,8	2393,6	238,0	5337,9
1984	410,6	5648,1	284,9	6261,1	205,5	3899,1	491,7	2419,4	261,0	5575,9
1985	370,5	6058,7	302,8	6546,0	350,0	4104,6	27,1	2911,1	153,1	5836,9
1986	322,6	6429,2	347,2	6848,8	215,6	4454,6	328,3	2938,2	291,2	5990,0
1987	489,1	6751,8	242,4	7196,0	313,8	4670,2	349,6	3266,5	444,8	6281,2
1988	306,4	7240,9	440,0	7438,4	322,9	4984,0	399,9	3616,1	286,7	6726,0
1989	580,9	7547,3	433,5	7878,4	278,0	5306,9	418,1	4016,1	552,2	7012,6
1990	524,0	8128,2	334,2	8311,9	539,5	5584,9	306,8	4434,2	331,6	7564,8
1991	445,0	8652,2	384,7	8646,1	255,0	6124,4	270,7	4741,0	286,3	7896,4
1992	341,0	9097,2	626,7	9030,8	134,9	6379,4	488,9	5011,7	347,3	8182,7
1993	438,7	9438,2	270,2	9657,5	397,1	6514,3	391,7	5500,6	340,1	8530,0
1994	495,0	9876,9	616,4	9927,7	296,8	6911,4	277,3	5892,3	350,4	8870,1
1995	265,0	10371,9	524,4	10544,1	130,8	7208,2	483,6	6169,6	298,9	9220,5
1996	526,9	10636,9	384,6	11068,5	242,0	7339,0	372,9	6653,2	328,0	9519,4
1997	510,3	11163,8	404,4	11453,1	178,5	7581,0	256,3	7026,1	346,7	9847,4
1998	320,7	11674,1	259,8	11857,5	164,5	7759,5	282,6	7282,3	913,8	10194,1
1999	345,5	11994,8	961,2	12117,3	79,0	7924,0	205,2	7564,9	746,5	11107,9
2000	262,8	12340,3	628,9	13078,5	77,5	8003,0	629,4	7770,1		11854,4
2001	726,8	12603,1		13707,4	196,5	8080,5	580,6	8399,5		
2002	609,4	13329,9			124,0	8277,0		8980,1		
2003		13939,3				8401,0				
2004										

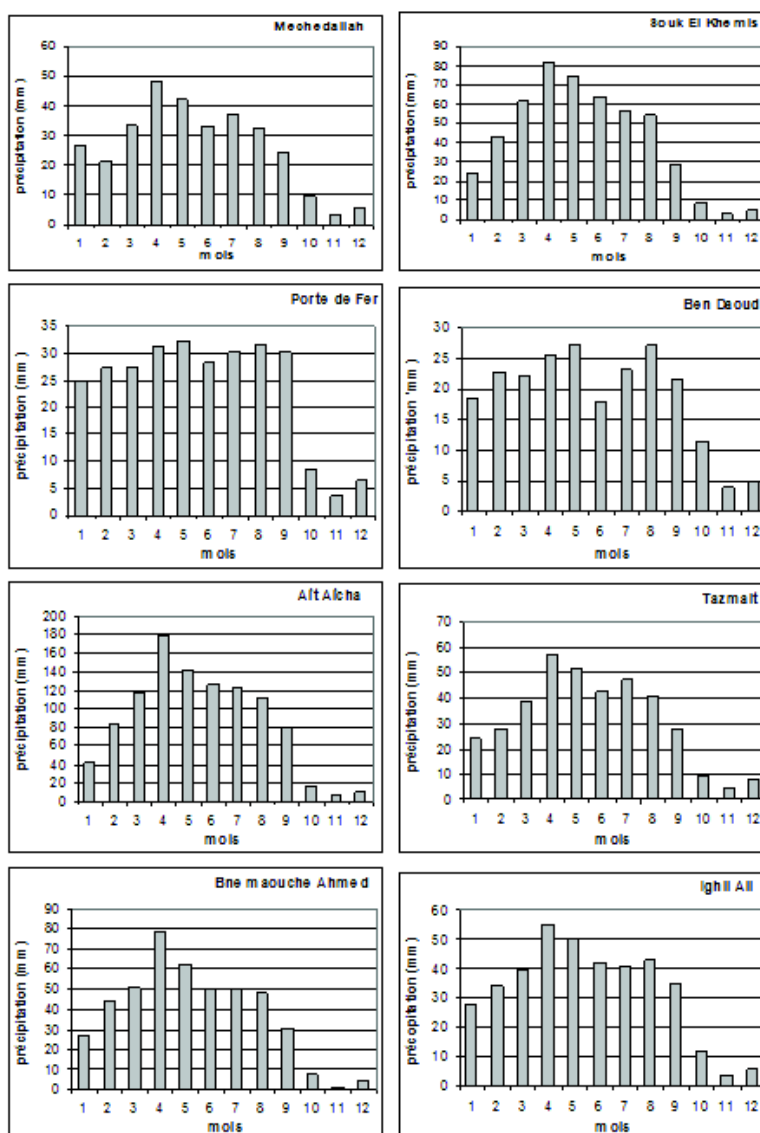
Annexe 7 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (période:1968-2004) dans le bassin versant de la Soummam et sa périphérie.

Regions	Code	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	avr	mai	juin	juil	août	année (mm)
1	15 01 01	28,7	32,7	46,5	59,7	56,7	47,5	41,2	49,9	34,6	8,8	7,1	11,3	424,6
	15 01 03	27,1	31,7	41,8	49,9	47,6	39,5	40,3	42,4	33,3	7,9	3,5	7,7	372,6
	15 02 01	27,5	39,5	44,5	67,8	58,7	44,2	48,8	41,1	33,4	10,2	7,3	7,6	430,5
	15 02 04	23,8	26,6	34,8	46,9	44,0	32,4	31,7	36,1	27,1	7,9	3,8	5,4	320,4
	15 02 08	29,3	31,8	50,3	69,3	59,3	45,6	50,6	46,8	31,0	11,7	5,2	9,1	440,0
	05 01 01	24,1	22,1	21,0	18,9	24,1	16,3	23,4	22,0	23,3	13,0	2,9	5,6	216,5
	05 04 02	23,6	22,3	29,9	30,2	34,0	26,3	23,8	24,3	21,3	8,1	2,9	10,1	256,7
	09 04 01	22,5	29,0	48,2	52,6	52,4	47,5	40,4	41,1	28,6	5,8	0,8	3,6	372,7
	09 04 02	24,0	42,6	61,6	82,0	74,8	64,0	56,9	54,1	29,3	8,7	3,2	4,9	506,0
2	15 03 01	26,6	21,4	33,4	48,0	42,2	33,1	37,3	32,5	24,3	9,5	3,5	5,9	317,6
	15 04 01	24,9	27,2	27,2	31,3	32,3	28,3	30,3	31,6	30,2	8,5	3,7	6,5	282,0
	15 04 02	18,5	22,7	22,2	25,6	27,2	17,9	23,1	27,1	21,7	11,4	4,1	4,9	226,3
	15 05 01	24,3	27,9	38,4	57,6	51,7	42,6	47,5	40,6	28,2	8,9	4,1	7,7	379,7
	15 05 03	27,8	34,3	39,6	55,2	50,3	42,2	40,7	42,8	34,8	11,9	3,8	5,9	389,3
	15 10 04	26,6	44,3	51,0	78,5	62,9	50,3	50,5	48,5	30,4	7,6	0,9	4,6	456,3
	15 10 06	26,1	38,7	46,9	81,4	65,9	57,7	51,9	53,0	35,0	10,1	4,8	8,2	479,7
	15 10 07	35,6	65,5	85,9	169,3	124,1	97,3	98,3	79,1	41,6	14,6	1,9	7,0	820,1
	02 15 09	41,8	84,2	117,2	178,5	142,4	126,1	121,8	112,2	78,6	17,6	6,6	9,9	1037,0
3	15 06 07	30,1	25,9	30,4	44,3	34,1	27,8	33,5	41,9	33,0	15,7	7,6	7,9	332,2
	15 06 08	32,7	33,5	33,3	54,7	45,5	39,1	46,1	43,2	37,0	19,9	6,7	11,1	402,8
	15 06 10	31,4	30,9	34,5	59,9	45,5	42,3	41,0	42,2	37,2	17,0	8,8	9,8	400,5
	15 06 11	30,9	33,9	41,4	60,9	53,6	39,8	43,7	43,8	34,9	15,3	6,3	6,3	410,8
	15 06 13	36,9	36,4	51,7	78,2	71,2	51,7	51,5	53,3	40,2	20,3	4,6	12,9	508,8
	15 06 14	23,2	23,0	21,6	23,6	19,1	17,5	25,2	30,8	30,0	11,3	5,4	9,3	240,1
	15 07 03	33,0	40,4	55,3	87,4	74,9	71,6	60,3	57,3	38,8	12,1	2,6	6,7	540,5
	15 07 06	37,9	43,0	51,4	94,3	74,4	64,2	62,0	59,2	43,5	16,8	9,2	11,9	567,7
	15 07 07	30,4	25,7	35,7	43,2	39,7	34,6	44,2	44,8	39,8	18,8	7,1	9,2	373,2
	15 08 01	29,4	26,3	32,1	35,5	38,1	26,5	32,6	40,1	34,2	16,6	3,7	7,2	322,3
	15 08 02	26,6	36,0	43,9	88,9	72,4	62,0	64,9	52,2	36,7	10,5	6,5	4,7	505,3
	15 08 07	27,9	43,2	47,7	63,2	53,8	46,8	53,1	52,6	38,9	12,6	4,6	9,3	453,8
	15 09 04	28,6	32,1	44,8	57,8	52,9	40,1	40,7	37,4	29,0	7,8	4,4	6,9	382,2
	03 02 04	35,3	40,9	58,5	103,7	81,7	70,7	63,5	60,9	41,3	13,3	4,2	9,5	583,5
	03 02 06	32,5	56,7	64,6	100,5	89,8	75,5	72,3	65,4	35,2	12,5	2,3	5,4	612,8
	05 08 02	27,1	29,8	27,8	31,7	43,1	26,7	34,7	31,6	26,7	10,0	5,1	5,5	299,7
05 09 06	32,6	27,7	35,1	46,1	41,1	32,9	34,0	37,7	32,1	13,0	6,7	10,8	349,8	
Moyenne		28,8	35,1	44,3	65,0	56,6	46,5	47,5	46,3	34,2	12,2	4,7	7,7	429,0

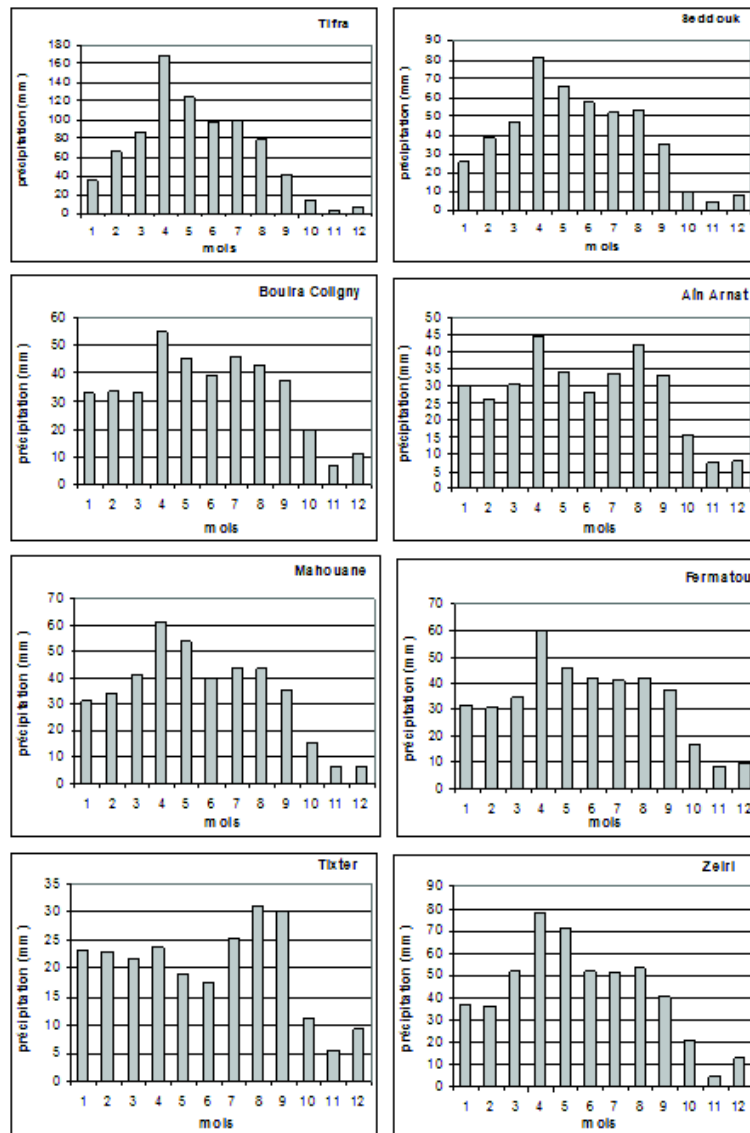
Annexe 8-1 : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004



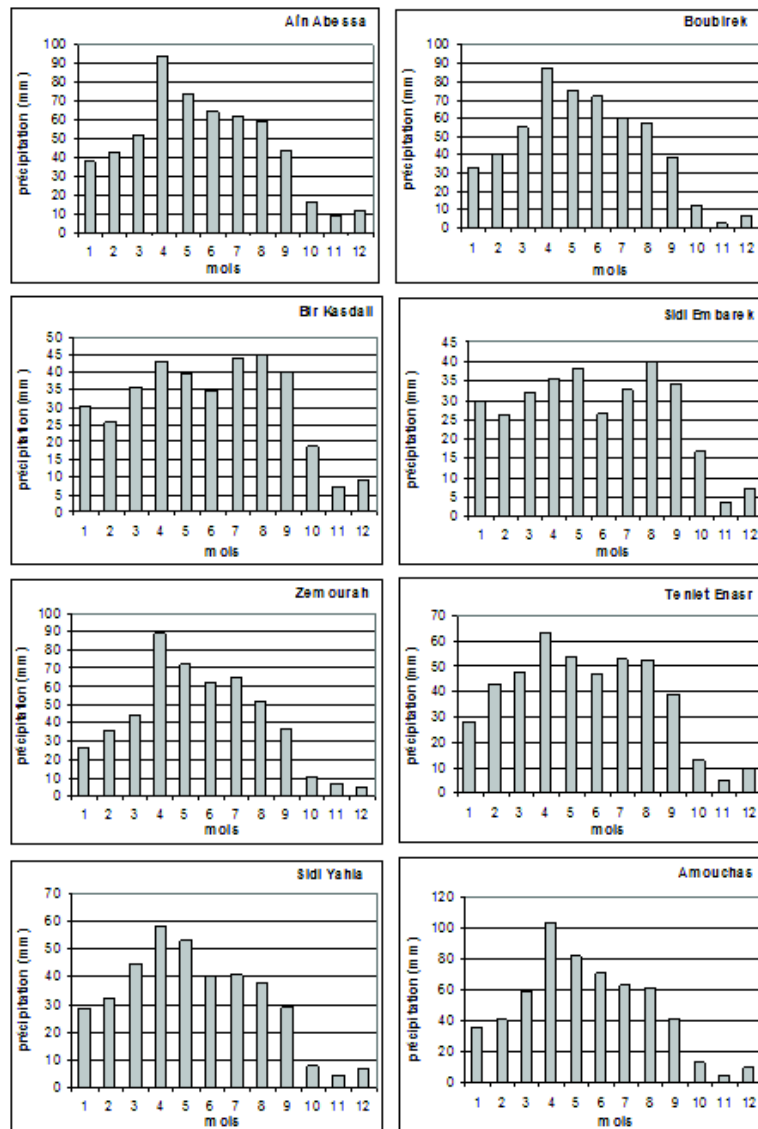
Annexe 8-2 : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004



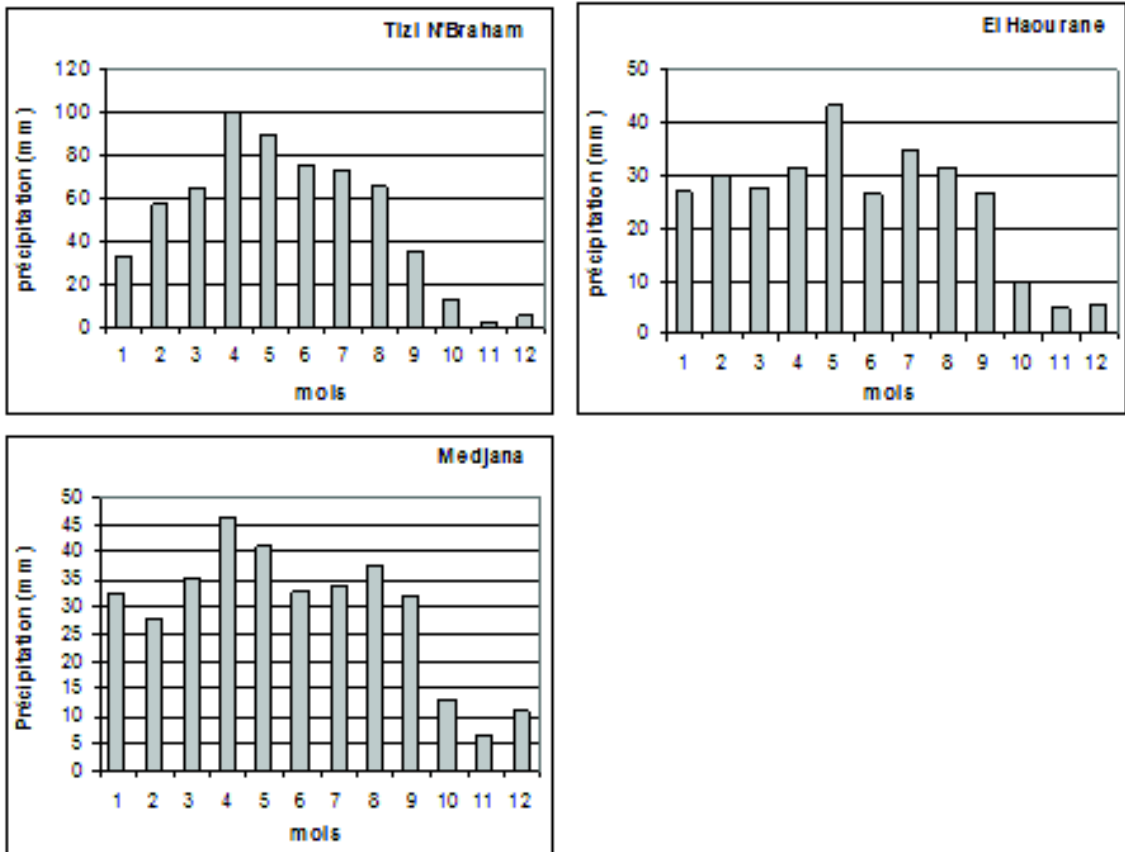
Annexe 8-3 : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004



Annexe 8-4 : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004



8-5 : Variation des précipitations moyennes mensuelles des stations de Septembre à Août durant la période 1968-2004



Annexe 9-1 : Paramètres climatiques mensuels interannuels aux niveaux des stations : Béjaïa, BBA, Sétif (1988-2004) et Bouira (1990-004)

Paramètres	station\ mois	Sept.	oct.	nov.	Déc.	Janv.	Fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	année
Précipitations (mm)	BOUIRA	33	38	56	72	90	45	31	52	47	10	3	14	489
	BEJAIA	52	64	82	143	121	72	56	78	42	12	9	8	738
	BBA	52	27	29	37	40	22	26	39	42	20	9	18	361
	SETIF	49	31	39	49	43	29	29	40	47	21	12	15	402
Température (1/10 °C)	BOUIRA	225	180	126	93	86	90	117	137	183	235	274	278	169
	BEJAIA	234	199	153	124	116	120	136	149	183	222	250	263	179
	BBA	215	165	107	69	63	80	104	124	178	234	275	272	157
	SETIF	206	158	99	62	55	68	97	112	168	222	265	262	148
Humidité Relative (%)	BOUIRA	65	72	78	82	83	80	73	71	68	56	51	52	69
	BEJAIA	75	74	76	76	78	76	75	76	78	76	75	74	76
	BBA	54	60	70	75	74	66	63	57	54	45	39	42	58
	SETIF	57	66	73	78	78	72	67	64	57	47	39	42	62
Tension de vapeur (1/10 hPa)	BOUIRA	170	143	113	96	90	91	104	107	135	151	165	172	128
	BEJAIA	212	174	131	108	101	105	119	128	165	202	231	247	160
	BBA	132	109	91	75	70	66	75	78	102	117	127	134	98
	SETIF	132	116	89	75	68	67	75	81	103	112	119	126	97
Pression (1/10 hPa)	BOUIRA	9542	9507	9508	9528	9537	9545	9518	9483	9606	9501	9505	9507	9524
	BEJAIA	10150	10160	10158	10189	10214	10209	10184	10144	10149	10157	10151	10149	10168
	BBA	9133	9139	9129	9135	9153	9145	9191	9096	9110	9129	9134	9139	9136
	SETIF	9018	9015	9011	9012	9044	9025	9010	8979	8995	9013	9023	9028	9014

Annexe 9-2 : Paramètres climatiques mensuels interannuels aux niveaux des stations : Béjaïa, BBA, Sétif (1988-2004) et Bouira (1990-004)

Evaporation (mm)	BOUIRA	207	158	95	77	73	76	125	132	185	255	322	311	2015
	BEJAIA	92	87	74	71	66	61	70	73	68	84	104	104	954
	BBA	241	171	100	73	73	93	147	166	230	324	415	348	2380
	SETIF	193	129	80	57	55	73	110	129	188	267	338	315	1933
Insolation (h)	BOUIRA	257	226	181	173	176	197	234	259	279	323	328	301	2934
	BEJAIA	229	196	163	146	159	176	206	231	267	300	324	292	2689
	BBA	258	235	191	182	179	200	241	257	298	325	344	300	3010
	SETIF	262	234	188	177	181	203	233	260	300	322	348	313	3020
Vent (1/10 m/s)	BOUIRA	29	28	27	28	27	28	28	34	31	33	32	29	29
	BEJAIA	28	30	33	36	34	34	31	32	28	29	29	29	31
	BBA	28	26	27	27	24	24	29	32	31	32	32	29	28
	SETIF	29	27	30	29	28	29	32	36	32	31	30	30	30
ETP (mm)	BOUIRA	105,7	65,9	31,8	17,0	18,8	30,6	62,9	89,7	123,1	160,4	178,5	156,9	1041,5
	BEJAIA	98,4	67,5	39,7	27,9	26,7	38,5	64,4	85,3	109,7	133,8	153,0	142,0	986,8
	BBA	110,8	67,6	34,2	18,1	20,5	34,3	67,6	95,3	131,9	161,4	187,7	165,3	1094,6
	SETIF	108,9	67,0	33,2	18,1	18,9	33,7	65,8	92,0	131,3	160,4	185,4	165,9	1080,7