

○ ○ ○ ○ ○
République Algérienne Démocratique et Populaire

○ ○ ○ ○ ○
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf -Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département des sciences et Techniques



N° Ref :.....

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Sciences Hydrauliques

**Étude de l'impact des variabilités climatiques
sur les eaux souterraines du bassin versant de
l'Oued Mellah (Nord-Est Algérien)**

Réalisé par :

- **ROUMAILI Ratiba**
- **TAHARI Besma**

Soutenu devant le jury :

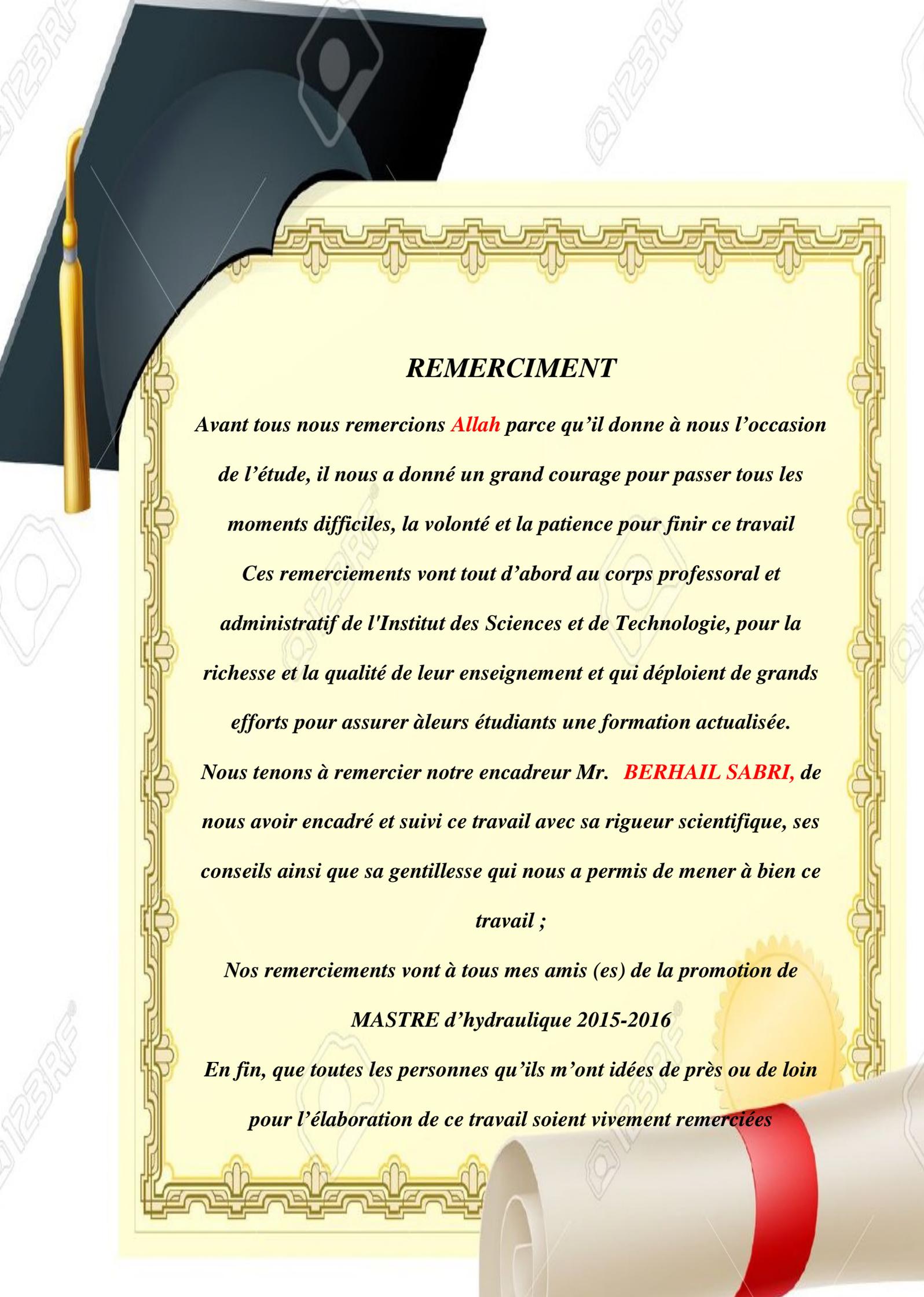
Mme. CHEBBAH L.	M.A.A	CUAB MILA	Président
Mr. MOUSSOUNI A.	M.A.A	CUAB MILA	Examineur
Mr. BERHAIL S.	M.C.B	CUAB MILA	Promoteur

Année universitaire : 2015/2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

اللَّهُمَّ آمِينَ





REMERCIEMENT

*Avant tous nous remercions **Allah** parce qu'il donne à nous l'occasion de l'étude, il nous a donné un grand courage pour passer tous les moments difficiles, la volonté et la patience pour finir ce travail*

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de l'Institut des Sciences et de Technologie, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

*Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. **BERHAIL SABRI**, de nous avoir encadré et suivi ce travail avec sa rigueur scientifique, ses conseils ainsi que sa gentillesse qui nous a permis de mener à bien ce travail ;*

*Nos remerciements vont à tous mes amis (es) de la promotion de **MASTRE d'hydraulique 2015-2016***

En fin, que toutes les personnes qu'ils m'ont idées de près ou de loin pour l'élaboration de ce travail soient vivement remerciées

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à

La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger,

*A Ma mère **Naima***

*Pour qui n'élevés avec patience et me montre le bon chemin de ma vie et me donner tous confiance et sécurité et ma soutenue financièrement A mon père. **TOUFIK***

*A ma grande mère **warda aychouche** le symbole de la tendresse et de la gentillesse*

*A Mes chers frères : **Farhat** et **Tarek Azize**.*

*A Ma très chère sœur : **Yasmine** et surtout mes oncles « **hamoudi** » et « **Faycel** » qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de
Générosité*

A mes tantes et à mes oncles maternel et paternel

*A tous mes cousins et mes cousines **Saif .Amir .tadj elddin.Aya.***

*A les petits enfants que je l'aime beaucoup **Abderrahman.***

Mahrez .Muatasim .Nizar .Danya

*A toute la famille **TAHARI***

*A mes meilleurs amis **Raouia . Ghada .Fatima .Nessrine***

***.Karima .Aicha .Djamel .Oussama .Amine .Bilal .Azeddine** et*

*N'oublie jamais Ma collègues de ce travail **Ratiba***

A l'ensemble de la promotion de l'Hydraulique

A tout ce qui a participé de loin et de près a la réalisation de ce travail

Besma

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à

*A qui me soutien toutes ma vie et, mon chemin elle est la plus
Chère chose dans ma vie qui m'a toujours inondé de sa tendresse, et
sa gentillesse qui m'a encouragé Et patience pour passer tous les
moments difficile ma mère **Lamria***

*A Mon cher père **Ahmed** Qui sans lui je ne serais pas arrivé
jusqu'ici. J'espère toujours rester fidèle aux valeurs morales que
vous m'avez apprises. Et me donner tous confiance et sécurité et ma
soutenue financièrement*

*A Mes chers frères : **Kamer, Mouhamed**, et chouchou de la maison
Youssef Aissa*

*A Mes très chère sœurs : **Radia, Mayada, Aya et Noor***

*A La petit fleure **Rawad** et son père **Chawki***

*A ma grande mère que je l'aime beaucoup **Rim***

A mes tantes et à mes oncles maternel et paternel

*A tous mes cousins et mes cousines : **Ikhlas, Islem, Inesse, Ihab,**
Juhayna, Jihan, Rayhana Rafif, Younes, Nessrine, Nadji, Hasni,
Sana, Nabiha, Oussama,*

A toute la famille Roumali et Robia

*À mes meilleurs amis **Raouia, Ghada, Fatima, Zahra, Karima,**
Aicha, Hayat, Djamel, Oussama, Salah, Bilal et N'oublie jamais Ma
collègues de ce travail **Besma***

A l'ensemble de la promotion de l'Hydraulique

*- A tout ce qui a participé de loin et de près a la réalisation de ce
travail*

Ratiba

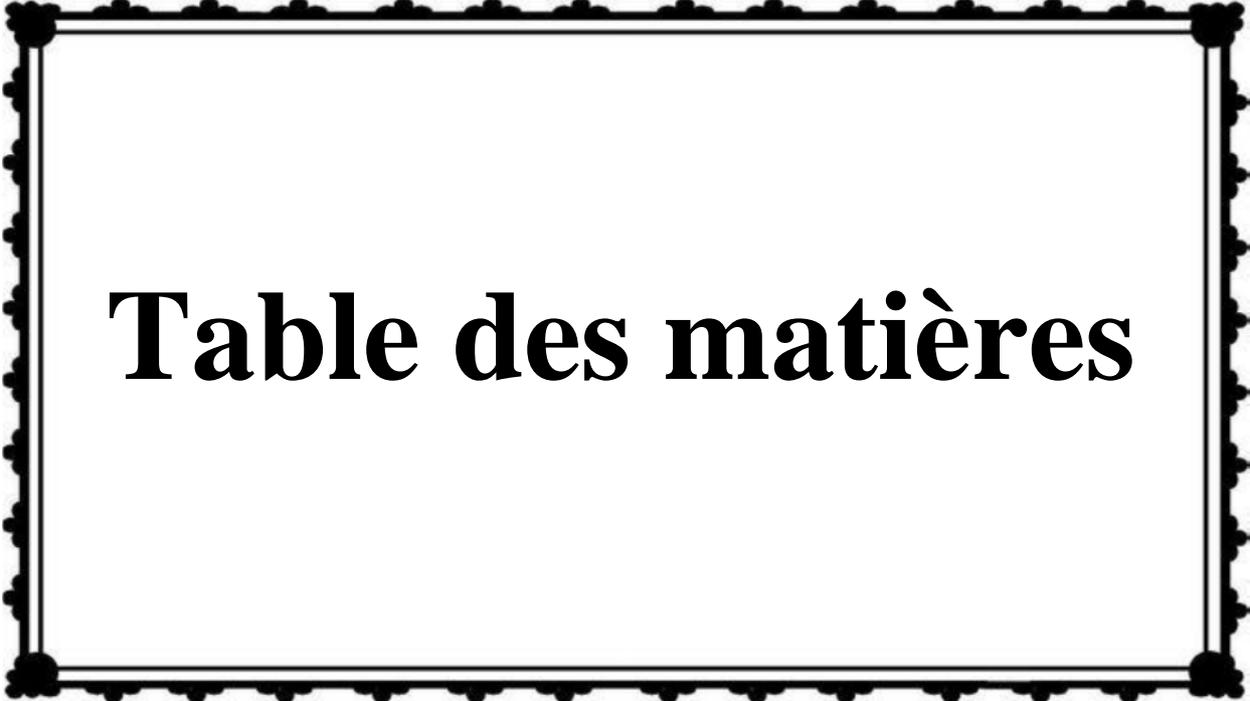


Table des matières

Table des matières

Remerciements	
Table des matières	I-II
Liste des tableaux	III
Liste des figures	IV
Résumé	V
Abstract.....	VI
ملخص	VII
Introduction générale.....	1-2
CHAPITRE 1 : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3-11
I. Introduction	3
II. Changement climatique	4
III. Sécheresse	6
IV. Sécheresse en Algérie	8
CHAPITRE 2 : REPRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE	12-27
I. Introduction	12
II. Cadre géographique	12
II.1 Situation géographique	12
II.2 Relief et climat.....	14
III. Géologie de bassin versant de l'Oued Mellah.....	16
III.1 La lithologie	16
III.2 Analyse stasigraphiques et tectoniques	17
III.2.1 La stratigraphique	17
III.2.2 La tictonique	17
IV. Morphologie du bassin versant de l'Oued Mellah.	18
IV.1 Introduction	18
IV.2 Caractéristiques phsiques du bassin	18
IV.3 Caractéristiques morphométriques du bassin.....	19
IV.3.1 Indice de compacité	19
IV.3.2 Le rectangle équivalent	20
IV.3.3 Relief et courbe hypsométrique du bassin versant	21
IV.3.4 Indice de pentes.....	23
IV.3.4.1 Indice de pente globale	23
IV.3.4.2 Indice de pente moyenne	24
IV.3.4.3 La dénivelé spécifique.....	24
IV.3.4.4 Temps de concentration	25
IV.3.4.5 Vitesse de ruissellement	25
V. Couvert végétal	26

CHAPITRE 3: LES LOIS DE TARISSEMEN	28-37
I. Définition du tarissement.....	28
I.1 La loi de Darcy	28
I.2 Lois de tarissement :les travaux de Boussinesq	29
I.3 Autres lois pour l'analyse de tarissement	30
I.4 Préférence pour les lois simples.....	31
II. Recharge-Définition et concepts et de la variabilité	31
II.1 Recharge - Définition et concepts.....	31
II.2 Mécanismes de recharge	32
II.3 La variabilité spatiale et temporelle de recharge	33
III. Aperçu des méthodes des d'estimation de la recharge	33
III.1 La méthode du bilan hydrique	33
III.2 La méthode par l'étude des eaux de surface.....	34
IV. Concept et principe de la méthode de Meyboom	36
CHAPITRE 4: RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	38-45
I. Introduction	38
II. Analyse des coefficients de tarissement	38
III. Analyse des volumes mobilisés	40
IV. Détermination de la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total	45
Conclusion générale.....	46-47
Bibliographie	48-55
Annexe	56-57



Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	surface et périmètre du bassin versant de l'Oued Mellah.....	19
Tableau 2	Caractéristiques morphométriques de bassin versant de l'Oued Mellah (D'après [86] et Annaires hydrologiques de l'A.N.R.H.).....	23
Tableau 3	Classification de l'ORSTOM pour différents reliefs.....	24
Tableau 4	récapitulation des caractéristiques morphologiques de bassin versant de l'Oued Mellah.....	26
Tableau 5	Les principales lois de tarissement.....	30
Tableau 6	Station hydrométrique du sous bassin versant Mellah.....	38
Tableau 7	Variation du coefficient de tarissement α (j^{-1}) du bassin de l'Oued Mellah (1977-2007).....	39
Tableau 8	Coefficients moyens de tarissement avant et après 1988.....	40
Tableau 9	Durées moyennes de tarissement (jours) avant et après 1988.....	40
Tableau 10	Résultats de calcul pour les premières récessions.....	42
Tableau 11	Résultats de calcul pour les deuxièmes récessions.....	42
Tableau 12	Tableau récapitulatif de l'estimation de la recharge des eaux souterraine du bassin versant de l'Oued Mellah.....	56-57
Tableau 13	Volumes d'eau mobilisés par l'aquifère avant et après la rupture de 1988.....	43
Tableau 14	Contribution du débit de base au débit total de l'Oued Mellah.....	45



Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Situation géographique du bassin versant de l'Oued Mellah.....	12
Figure 2	carte du réseau hydrographique de l'Oued Mellah.....	14
Figure 3	carte du relief du bassin versant de l'Oued Mellah.....	15
Figure 4	Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Mellah.....	16
Figure 5	Coupe schématique illustrant la limitation de la Zone non saturée et la zone saturée dans la plaine de Bouchegouf.....	18
Figure 6	Carte hypsométrique du bassin versant de l'Oued Mellah.....	21
Figure 7	Carte des altitudes du bassin versant de l'Oued Mellah.....	22
Figure 8	Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Mellah.....	22
Figure 9	la carte de couvert végétal de l'Oued Mellah.....	27
Figure10	Courbe de tarissement, période et segment.....	29
Figure11	les différents mécanismes de recharge selon.....	32
Figure12	Exemple d'un tracé semi-logarithmique de la méthode de Meyboom.....	37
Figure13	courbe du tarissement de la station de Bouchegouf : (a) 1977 et (b) 2007.....	38
Figure14	Variabilité du coefficient de tarissement.....	39
Figure15	Un exemple de deux récessions qui s'est produite en Mars à Avril, 1977 à la station de Bouchagouf.....	41
Figure16	Un exemple de deux récessions qui s'est produite en Mars à Avril, 2007 à la station de Bouchagouf.....	41
Figure17	Variations interannuelles de volume d'eau mobilisée (1977-2007) à la station de Bouchegouf.....	43
Figure18	Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé d'Oued Mellah.....	44

RESUME :

L'Algérie est l'une des régions les plus vulnérables face aux impacts et changement climatique au cours du 21^{ème} siècle. Le nord de l'Algérie a connu une variabilité à la baisse de la pluviométrie annuelle au cours du 20^{ème} siècle. Cette variabilité s'est accentuée à partir des années quatre-vingt et a eu des impacts importants sur la ressource en eau superficielle et souterraine.

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine du bassin versant de l'Oued Mellah à partir du modèle de Maillet qui consiste à analyser la variation du coefficient de tarissement et le volume d'eau mobilisé par l'aquifère. Les résultats obtenus mettent en évidence une diminution des volumes d'eau mobilisés par les aquifères et suggèrent une régression considérable des ressources en eau souterraine sous l'influence des changements climatiques.

Mots clés : Changement climatique, Ressources en eau, Modèle de Maillet, Bassin versant de l'oued Mellah, Algérie.

Abstract:

Algeria is one of the most vulnerable regions facing the impact and climate changes during the 21st century. The north of Algeria has known variability because of the decrease of the annual rainfall during the 20th century. This variability has been accentuated since the 1980's and got some important impacts on the resources of superficial and underground water.

The objective of this study is to evaluate the impacts of the climate changes on groundwater resources of Mellah Watershed starting from the Maillet model which consists of analyzing the variation of the coefficient of the dry and mobilized water by the aquifer. The results obtained put in evidence a decrease in mobilized water volumes by the aquifers and suggest considerable regression of groundwater resources under the influence of climate change.

Keywords: climate changes, water resources, Maillet model, Mellah watershed, Algeria.

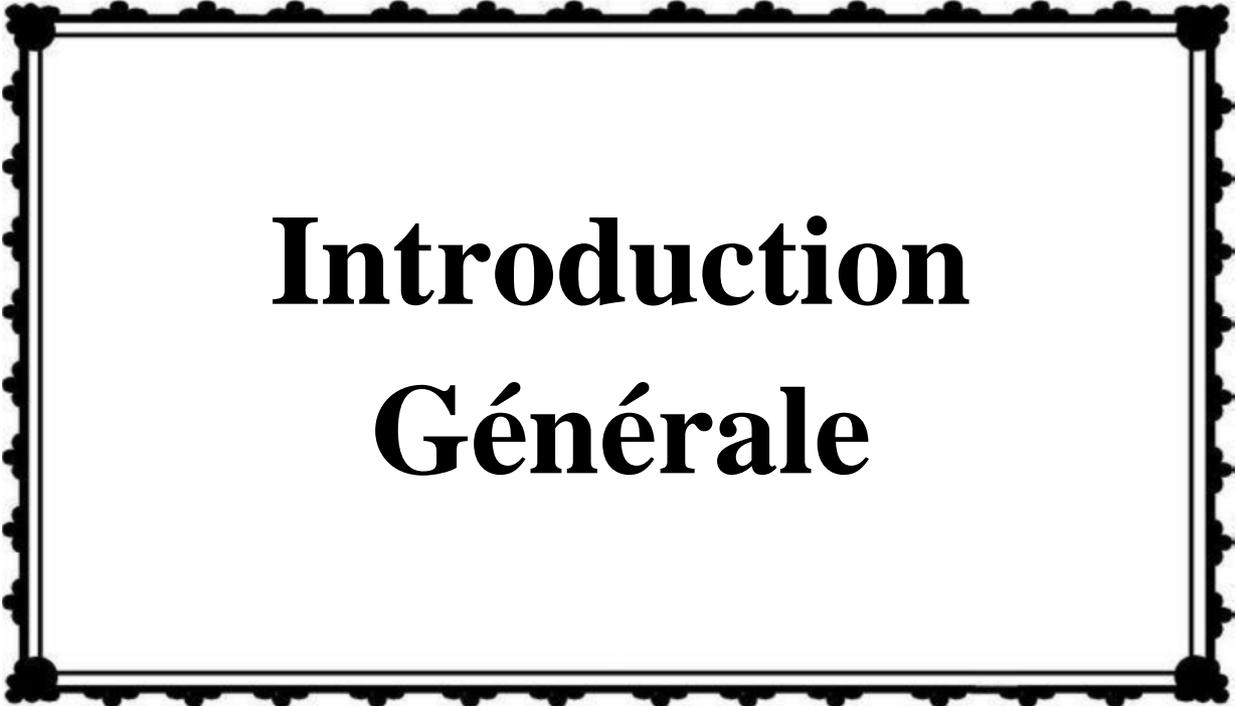
Abstract

ملخص

الجزائر هي واحدة من أكثر المناطق عرضة للتأثيرات المناخية في القرن الواحد والعشرون حيث شهد شمال الجزائر انخفاض هطول الأمطار السنوي خلال القرن العشرين. لوحظ هذا التباين في الثمانينات وتم زيادة تأثيراتها على الموارد السطحية والجوفية.

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم آثار تغير المناخ على موارد المياه الجوفية من مستجمع المياه واد ملاح باستخدام نموذج Maillet , الذي يعتمد على تحليل منحنى إفراغ المياه الجوفية. النتائج التي تم الحصول عليها تظهر انخفاضا في كميات المياه المعبأة من قبل طبقات المياه الجوفية وتشير إلى تراجع كبير لموارد المياه الجوفية تحت تأثير تغير المناخ.

الكلمات المفتاحية : التغيرات المناخية ،الموارد المائية ،نموذج Maillet ،مستجمع المياه واد ملاح.



Introduction Générale

Introduction générale

L'importance de l'eau pour la vie sur terre en général et pour les activités de l'homme en particulier fait que les scientifiques et les gestionnaires de l'environnement s'inquiètent désormais des conséquences des changements climatiques sur le cycle hydrologique, la disponibilité et la qualité de la ressource en eau. En effet, l'un des plus grands défis auxquels l'humanité fait face aujourd'hui est le réchauffement climatique qui correspond à une augmentation progressive, prévue ou observée, de la température à la surface du globe, qui est l'une des conséquences du forçage radiatif provoqué par les émissions anthropiques [1]. C'est le réchauffement climatique qui entraîne les changements climatiques qui intègrent alors une composante anthropique qui se surimpose à la variabilité naturelle du climat. Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), une distinction est faite entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat due à des causes naturelles qui sont entre autres les changements de l'orbite terrestre et de l'activité solaire, les cycles d'apparition des taches solaires, les éruptions volcaniques et les fluctuations des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols. La variabilité climatique est donc une modification naturelle du climat et indépendante des activités humaines. Contrairement à la Convention, le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) considère le «changement climatique» comme toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines [2].

Les principales questions qui se posent face au changement climatique sont l'évolution de la recharge, des lignes d'eau, et la salinisation des aquifères littoraux du fait de l'élévation du niveau marin.

L'infiltration de l'eau dans le sol et donc la recharge des nappes dépendent directement des précipitations et de l'évapotranspiration. D'autres paramètres influent également sur l'infiltration, comme l'intensité des précipitations, la couverture végétale, le type de sol, et les prélèvements anthropiques dans les nappes. [3]

Les eaux souterraines paraissent donc sensibles au changement climatique. Elles sont particulièrement vulnérables aux sécheresses, aussi bien directement qu'indirectement [4].

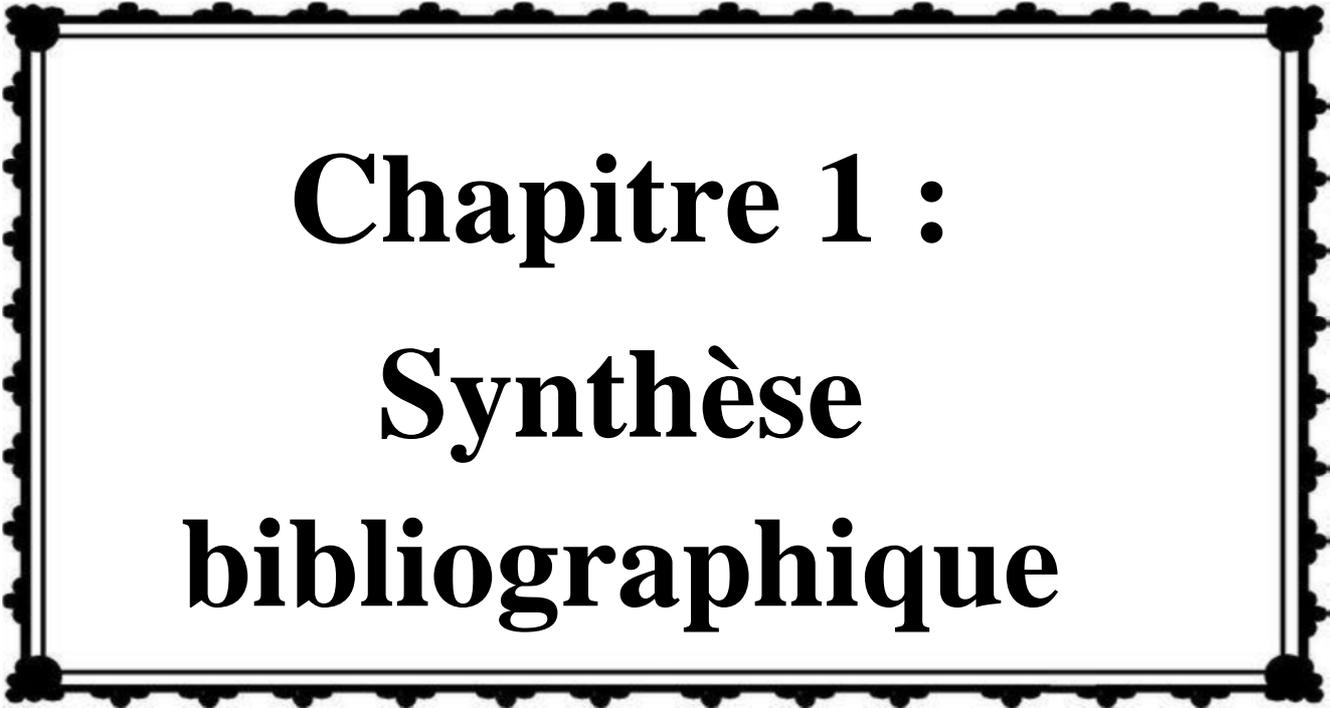
Les études menées jusqu'à maintenant sont basées principalement sur la modélisation de la recharge des nappes [3] suggèrent la possibilité d'effectuer des études statistiques, basées sur des observations, qui testeraient des corrélations entre niveaux piézométriques et variables climatiques, et permettraient vraisemblablement d'attribuer les variations de recharge constatées à des variations climatiques, aux prélèvements dans la nappe, ou à d'autres facteurs jouant sur la recharge comme l'usage du sol.[5]

Introduction générale

L'objectif de cette étude est d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine du bassin versant de l'Oued Mellah. Cette étude est basée sur l'hypothèse selon laquelle la forte variabilité climatique observée au cours de ces dernières décennies aurait entraîné une diminution des réserves aquifères. La méthodologie s'est appuyée sur la loi de Maillet qui consiste à analyser la variation du coefficient de tarissement et le volume d'eau mobilisé par l'aquifère, on utilisant une série chronologique des débits journaliers s'étalant sur la période 1977-2007 mesuré à la station de jaugeage de Bouchegouf du bassin versant de l'Oued Mellah.

Ce travail se compose de quatre (04) chapitres qui s'articulent autour de l'impact du changement climatique sur les ressources en eau souterraine du bassin versant de l'Oued Mellah.

- Tout d'abord, nous commençons, dans le chapitre 1, par une synthèse bibliographique qui donne un aperçu sur le changement climatique, et les conséquences de ce dernier sur le cycle hydrologique, en mettant plus de lumière sur le phénomène sécheresse.
- Ensuite, et dans un deuxième chapitre, nous examinons les principales caractéristiques du bassin versant de l'Oued Mellah, qui a été choisi comme bassin d'application de notre travail pour la disponibilité des données, et malgré l'absence quasi-totale d'études sur l'influence du changement climatique au ressource en eau souterraine.
- le chapitre 3, constitue l'introduction à l'analyse du tarissement. Il permet de faire le point sur les principales lois appliquées au tarissement des cours d'eau, en justifiant le recours à la loi de Maillet, puis il s'intéresse plus particulièrement aux méthodes de quantification et de calcul de volume d'eau mobilisé par les aquifères.
- Dans le dernier chapitre, nous évaluons l'utilisation et la présentation des résultats d'analyses des coefficients de tarissement obtenu pour la période de 1977-2007, ainsi que les volumes d'eau mobilisé par l'aquifère dans le bassin versant de l'Oued Mellah.
- Conclusion générale



Chapitre 1 :
Synthèse
bibliographique

I. Introduction :

A la fin de ce siècle, le changement climatique est devenu l'un des sujets d'actualité. On lit souvent dans la presse les titres comme : "Le climat change-t-il" ? "La terre se réchauffera t- elle" ? ...etc.

Ce genre de questions est souvent posé, vu l'impact de ces changements sur le plan socio-économique de plusieurs pays, en particulier ceux du globe les moins développés au plan technique, et où l'économie est fondée sur l'agriculture, généralement non irriguée. Dans certains pays en développement, en Asie par exemple les inondations comptent parmi les événements météorologiques les plus dommageables aux communautés. Quant à la sécheresse, c'est un phénomène qui s'est produit en de nombreux endroits du globe, avec des ampleurs et du durées variables. Au-delà de la grande polémique sur les causes réelles des dérèglements climatiques contemporaines [6,7], l'augmentation des températures qui est observée par une grande majorité de stations dans le monde, constitue un fait indéniable et confirme ainsi la réalité du réchauffement climatique global [8]. Ainsi la décennie 2001-2010 et l'année 2010, à égalité avec 2005 et 1998, sont-elles considérées par [9] comme les plus chaudes à l'échelle mondiale depuis que l'on dispose de relevés météorologiques.

Parallèlement à cette hausse, une augmentation probable des précipitations est attendue [10]. Ces dernières années, les pluies ont occasionné de violentes inondations un peu partout dans le monde. En juillet 2007, la Grande-Bretagne a fait face à ses plus graves inondations depuis plus de soixante ans. En 2008, les pluies de mousson ont été extrêmement fortes en Inde. En 2009, dans cette même région du monde, c'est au Pakistan que les pluies de mousson ont été particulièrement dévastatrices. En 2010, l'Australie a connu les plus grandes inondations de son histoire, avec près de quarante villes du Nord-est du pays touchées et plus de 200000 personnes affectées [11]. En 2011, la Thaïlande a subi les plus graves inondations jamais observées dans cette partie du monde. Enfin, en 2013, l'Inde a fait face une nouvelle fois à une mousson exceptionnelle [12], par sa rapidité de déplacement et par sa violence (plus de 5000 personnes ont péri dans des inondations meurtrières), tandis que l'Europe centrale était touchée par des inondations d'une ampleur jamais observée depuis près 500 ans (La Chaîne Météo, 2013), conséquences des très fortes pluies tombées sur l'Autriche, l'Allemagne, la Hongrie et la Tchéquie.

Si la recrudescence de tels évènements est bien réelle, ces épisodes peuvent cependant, suivant le degré de leurs intensités, être ressentis d'une manière tout à fait différente d'une région à une autre du globe [13-16].

L'Afrique du Nord a connu plusieurs grandes sécheresses durant ce siècle, tels que ceux des années 40 et les années 80 jusqu'à nos jours. Ainsi, l'évolution des températures (hausse des minima et des maxima) est conforme à la situation

mondiale [17,18]. Les pluies enregistrées dans cette partie du monde s'inscrivent aussi dans les évolutions générales [19,20].

En plus, après deux décennies de sécheresses observées dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, l'amorce de périodes beaucoup plus humides est notée en Algérie et dans tout le Maghreb [21]. Le retour des pluies de la dernière décennie est une chance pour les agricultures, il n'en est pas de même pour les citadins. En effet, les fortes averses provoquent des inondations et causent de gros dégâts matériels, voire des pertes humaines. Les pluies, qui avaient été tant attendues, sont ainsi devenues de plus en plus redoutées.

La sécheresse des années 80 jusqu'à nos jours a été caractérisée par son ampleur spatiale, son intensité et par son impact majeur et sensible qui est la diminution des ressources en eau [22-28]. Etudier l'impact négatif de la variabilité climatique sur les ressources en eau est devenue un impératif de plus en plus pressant en Algérie.

II. Changement climatique :

Il est maintenant largement reconnu que le climat de la terre change comme en témoigne la décennie 1990, la plus chaude depuis dix siècles [29]. Plusieurs manifestations climatiques récentes de grande ampleur ont poussé la communauté scientifique à s'intéresser aux changements climatiques et à leurs conséquences socio-économiques.

Parmi ces manifestations on peut citer :

- La sécheresse qui a touché les deux bandes tropicales de notre planète, surtout les régions sahéniennes d'Afrique de l'Ouest, depuis les années 70. [30]
- Les constatations de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) sur le réchauffement de la planète évalué à 0.5 °C depuis la moitié du siècle dernier [31] La moyenne décennale des températures (2001 – 2010) représente la moyenne la plus élevée depuis le début des relevés des instruments météorologiques [09].

Parmi les résolutions communes aux études effectuées par la communauté scientifique [29], il y a la mesure précise des fluctuations et leur interprétation statistique. Dans ce cadre plusieurs méthodes de détection des changements climatiques ont été mises au point [32-34]

Les changements climatiques supposent la variation à long terme des valeurs moyennes des caractéristiques statistiques des variables étudiées sur des périodes de longue durée. Cette notion diffère de la variabilité climatique qui suppose la stationnarité et décrit la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles par rapport aux valeurs temporelles de référence. Le suivi du cycle climatique de l'eau, reconnu comme l'un des manifestations majeures du climat, permet d'appréhender certains

aspects de l'évolution de ce dernier. Ainsi, [35] ont indiqué que les variables les plus adaptées pour le suivi du climat sont :

- Le débit des rivières,
- Le niveau des lacs,
- Les précipitations,
- Les températures de l'air et de l'eau,
- La date de rupture du couvert de glace et sa durée et,
- Le niveau des eaux souterraines.

Les évolutions possibles de ces variables climatiques peuvent être ramenées à deux types de modifications à analyser [35] :

- Le changement de la moyenne
- Le changement de la variance.

De nombreuses études à travers le monde ont été menées pour la détection de ces changements. En Afrique sahélienne et non sahélienne beaucoup d'auteurs ont mis en évidence, à partir des séries hydro-pluviométriques, une phase sèche qui a débuté vers les années 1970 et qui perdure jusqu'à présent. Dans cette région, il a été constaté :

- Diminution de la pluviométrie annuelle [36- 41].
- Diminution du nombre de jours de pluie [38,39] et [41-43].
- Diminution des débits des rivières [44,45]
- Diminution des niveaux des lacs [44]
- Fortes intensités de pluies [29, 39,41] ainsi qu'un raccourcissement de la saison pluvieuse [41,46]

[47] a mis en évidence, à l'aide du filtre récursif passe-bas de Hanning d'ordre 2 :

- La succession de phases sèches et humides à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) ;
- La dernière phase sèche en date a commencé vers les années 1980 et se prolonge jusqu'à nos jours ;
- Malgré cela, avec les tests il n'a pas détecté de rupture de la stationnarité dans la série chronologique étudiée ;
- Les précipitations sont significativement corrélées aux indices d'oscillation australe pendant la saison de pluies.

[48] a étudié aussi l'évolution pluviométrique par rapport à l'indice de normalité sur quelques pays méditerranéens (Italie, Algérie, France, Grèce, Espagne Maroc, Portugal et Moyen-Orient) et a montré que :

- L'occurrence du déficit en précipitations dans une très vaste zone durant les années 1944, 1945, 1970, 1973, 1980, 1981, 1989 et 1990, où au moins entre 4 et 6 des huit sous régions traitées ont été touchés ;

- Certaines zones sont plus affectées que d'autres, par exemple l'Algérie et l'Espagne dans la partie occidentale et la Grèce et le Moyen-Orient dans la partie orientale ;
- Généralement, la sécheresse est apparue sur la majorité des pays du bassin méditerranéen depuis les débuts des années 80.

Les études effectuées par [29] sur le changement climatique des pays du bassin méditerranéen, prévoient :

- Une augmentation des températures et ;
- Une accentuation de la variabilité climatique.

Cela s'est particulièrement caractérisé par une modification de l'intensité, de la répartition des précipitations, et une amplification des phénomènes extrêmes tels que l'inondation et la sécheresse. La rapidité et la persistance de ces phénomènes, dans le temps et dans l'espace, présagent que cette tendance est en passe de devenir structurelle en relation avec le réchauffement climatique.

III. Sécheresse :

Selon l'Organisation météorologique mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes ont été affectées par les sécheresses [49]. Selon certains scénarios des changements planétaires, l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir [50]. En 2000, la perte de bétail due à une sécheresse grave en Asie méridionale et au Proche-Orient a causé la mort de nombreuses personnes. Au sud de l'Afghanistan, la population entière (300 000 familles) du désert du Registan a fui lorsque leurs sources d'eau se sont asséchées. Au Pakistan, la sécheresse dans les provinces du Baloutchistan et de Sindh a été signalée comme étant l'une des pires de l'histoire du pays. En Iran, 18 des comtés et 28 provinces ont été confrontés également à une sécheresse grave. Le Tigre et l'Euphrate en Iraq ont également connu une baisse de leur niveau pour atteindre environ 20% de leur débit moyen [51].

[52] montrent, suite à une analyse d'un indice des précipitations annuelles au Sahel ouest africain, que la sécheresse n'est pas encore terminée en fin de l'année 2000. Cependant, les modifications climatiques subies par l'Afrique durant le XXème siècle sont très nombreuses et n'ont pas les mêmes emprises [53]. En effet, pour l'Afrique Centrale, les modifications les plus importantes sont survenues au cours de la première moitié du siècle avec une augmentation de la pluviométrie annuelle. Quant à l'Afrique de l'Ouest, une diminution très marquée de la pluviométrie depuis la fin des années 1960 a été détectée. Elle a de plus une étendue qui ne semble pas avoir eu d'équivalent au cours du XXème siècle. Les pays comme le Ghana, le Togo, le Bénin et la partie maritime du Nigeria n'ont connu aucun changement notable. L'Afrique sahélienne a été la plus sujette à de nombreux changements au cours du siècle: dans son ensemble, elle a subi une augmentation de la pluviométrie vers

1940 puis une diminution vers 1970; sa partie centrale a subi une augmentation de la pluviométrie vers 1919 puis une diminution vers 1970.

Les travaux de [54] ont signalé par le test de PETTIT, l'existence d'une rupture préférentielle autour des années 1970 au niveau des grands cours d'eau du Côte d'Ivoire. L'année 1970 a été aussi relevée comme année de rupture par [55] sur les débits du Bani à Douna au Mali, avec une diminution de 68 %. Ils mettent aussi, en évidence que les ruptures hydrologiques sont en phase avec les ruptures pluviométriques. Cette concordance des dates de rupture montre que le régime des cours d'eau est fortement lié à celui des précipitations.

Ces années de rupture sont aussi en phase avec le découpage donné par le filtre passe-bas de Hanning de la station de Grand-Lahou. Ces années s'insèrent dans la période de rupture de la plupart des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire, à savoir 1966-1971 [41]. Ces ruptures montrent aussi que la région de Grand-Lahou s'inscrit globalement dans la fluctuation du régime pluviométrique observée entre la fin des années 1960 et le début des années 1970 en Afrique de l'Ouest et Centrale [36,38,41,56]

[57] a signalé une tendance des coefficients de tarissement à la hausse à partir de la rupture de 1970 dans le bassin versant du N'zo à l'Ouest du Côte d'Ivoire. Les volumes mobilisés ont évolué inversement aux coefficients de tarissement. Ces volumes ont régulièrement baissés depuis l'année 1986 qui est caractérisée par une très faible pluviométrie. En effet, l'année 1986 est l'année qui a été marquée par une sécheresse particulièrement intense dans la région de Soubré. Cette sécheresse a contribué à la réduction des réserves d'eau de la région et a même affecté la recharge souterraine, ce qui a contribué à rendre les volumes mobilisés dans les différents bassins versants de la région. Les études de [36] ont également observé une augmentation des coefficients de tarissement dès 1969 sur cinq sous-bassins du fleuve Niger. Ces constatations ont également été faites par [58] qui a signalé ce phénomène sur les bassins versants du Tchad. [59] a fait ce même constat dans le bassin béninois du fleuve Niger.

Tout comme l'Afrique de l'Ouest et centrale, les pays d'Afrique du Nord n'échappent pas non plus à cette variabilité climatique. Les travaux sur la Tunisie, dans le même ordre d'idée, [60] ont mis en évidence une baisse significative (sans rupture de stationnarité des séries) des précipitations annuelles en Tunisie centrale, entre 1976 et 1989.

Une étude de la sécheresse météorologique et hydrologique dans la région de Siliana en Tunisie a été effectuée en se basant sur plusieurs indices [61]. Les résultats obtenus montrent que la méthode des écarts à la moyenne donne un pourcentage de 60 % d'années sèches. L'analyse fréquentielle révèle que la sécheresse est de classe modérée (35 %). La fréquence d'apparition d'années successives sèches est relativement élevée : 55 % d'années sèches sont formées de

deux, trois ou cinq années sèches consécutives. Quant à la sécheresse hydrologique, elle est plus accentuée, prouvant la dissymétrie des apports et la tendance générale des phénomènes hydrologiques à la faible hydraulicité. Simultanément, [62] a étudié la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov sur des séries de pluviométrie annuelle. Cette méthode a été déjà appliquée à l'échelle journalière et saisonnière [63]. L'auteur prouve que la persistance des années sèches est plus fréquente dans les régions du nord et du centre du pays. De plus, la probabilité d'avoir deux années sèches consécutives varie de 23 à 40 % suivant une croissance du sud-ouest au nord-ouest.

Les études effectuées sur la pluviométrie et les apports de l'oued Merguellil ont connu une baisse assez significative ces dernières décennies [64], et l'année 1988-1989 est aussi apparue dans plusieurs variables comme une année de rupture [61, 64,65]

IV. Sécheresse en Algérie :

Plusieurs travaux sur la pluviométrie en Algérie ont été menés depuis le dernier siècle, mais la plupart d'entre eux en font une analyse superficielle sur quelques stations en se basant sur le calcul de la moyenne. Ce n'est qu'en 1946 grâce aux travaux de Seltzer sur le climat de l'Algérie qu'une analyse détaillée sur la pluviométrie est établie.

En Algérie, en considérant les stations du nord par une méthode comparative des moyennes (1974-1992 par rapport à celle de Chaumont 1913-1963) et à la moyenne de longue durée (1922-1992), ont constaté que :

- L'ampleur du déficit pluviométrique de la dernière période 1974-1992 s'intensifie d'Est en Ouest ;
- Ils mettent en évidence la tendance à la sécheresse des vingt dernières années et font apparaître des sécheresses analogues durant les années 1913 et 1940.

[48] donnent l'évolution d'un indice de sévérité de la sécheresse sur la même région et relèvent l'occurrence de sécheresse sévères et généralisées durant des années très isolées : 1937, 1961, 1970.

En étudiant aussi les données de 120 postes pluviométriques du Nord de l'Algérie, [24] a mis en évidence par une analyse en composante principale une succession de quatre phases pluviométriques :

- Une longue phase où la pluviométrie est supérieure à la moyenne de 6 %, de 1922 à 1938.
- Une courte phase sèche débutant en 1939 et s'arrêtant en 1946 à l'ouest et au centre du pays avec un déficit de l'ordre de 11 %.
- Une phase pluvieuse qui dure jusqu'en 1972 environ.

- Une longue phase sèche qui s'affirme dès la fin de 1973.

[66] appliquent une analyse en composantes principales avec rotation Varimax sur deux réseaux et sur deux périodes différentes ; ils ont abouti à une division régionale de l'ouest Algérien pour une analyse spatio-temporelle de la pluviométrie. Les auteurs ont remarqué que :

- La sécheresse des années 40 est principalement due à une baisse de pluie de printemps et que;
- Celles des années 80 à une baisse de pluie d'hiver.

[22] a étudié la sécheresse sur les stations pluviométriques du nord-ouest algérien. Il aboutit aux résultats suivants :

- A partir des variables centrées réduites des totaux annuels, l'analyse a mis en évidence la succession de deux phases, un long épisode globalement pluvieux qui s'est étendu entre le début des années 50 et la fin des années 70, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé au début des années 80 et qui persiste jusqu'à son étude ;
- Les pluies d'hiver durant la décennie 1990-2000 ont connu généralement une baisse pour les stations d'étude ;
- Les résultats obtenus par l'étude de la sévérité de la sécheresse, en utilisant différentes méthodes comme celles des quintiles et des Terciles, confirment la persistance et l'abondance des années déficitaires durant les deux décennies 1980-1990-2000 pour la région d'étude ;
- Il montre aussi, que le modèle Markovien ajuste bien les séquences pluvieuses, par contre l'ajustement des séquences sèches par ce modèle montre qu'il existe une grande différence entre les fréquences calculées et les fréquences théoriques surtout lorsque nous allons vers des seuils plus grands ;
- L'analyse de l'étude de la relation entre l'ONA et la pluviométrie à partir de la corrélation montre qu'il y a un lien entre cette oscillation et la pluviométrie dans cette région d'étude.

[27,67] mettent, par des études de la sécheresse aux stations du nord de l'Algérie, en évidence une diminution pluviométrique au cours des dernières décennies. Ce déficit génère un grave problème d'ordre économique et social, compte tenu de la pression croissante qui exerce sur la ressource en eau (alimentation en eau potable, irrigation....).

[28] signale par une étude sur les apports des cours d'eau de l'est algérien que 1987-1988 est l'année la plus marquée par la sécheresse hydrologique (faible hydraulicité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002.

[68-73] mettent en évidence par des études de la sécheresse aux stations du nord-est de l'Algérie (région de la Medjerda) le suivant :

- Diminution pluviométrique au cours des dernières décennies (1970-1980-1990-2000) ;
- Diminution des débits de la rivière de la Medjerda durant ces mêmes décennies ;
- Augmentation de la température et de l'évapotranspiration durant ces mêmes décennies ;
- Fortes intensités de pluies ;
- Diminution des apports liquides au niveau du barrage d'Ain Dalia, et les années 1988-1989, 1993-1994 et 2001-2002 ont connu une baisse jamais atteinte depuis sa mise en service.

D'autres études menées par [74] sur la sécheresse en Algérie montrent que, durant l'année 1988-1989 les barrages de l'Ouest et du Centre se sont asséchés. Ceci est moins ressenti à l'Est de l'Algérie. C'est ainsi que, la situation de l'approvisionnement en eau potable est devenue de plus en plus difficile à gérer. L'année 1988-1989 a été classée comme année sèche pour l'Algérie.

Récemment, [75] ont montrés que, suite à une étude des chaînes de Markov appliquée sur les stations pluviométriques de l'Algérie du Nord,

- pour avoir une année non sèche après une année sèche, la probabilité est plus importante au centre du pays qu'elle est à l'ouest et,
- pour avoir deux années sèches successives, la probabilité est plus importante à l'ouest qu'au centre.

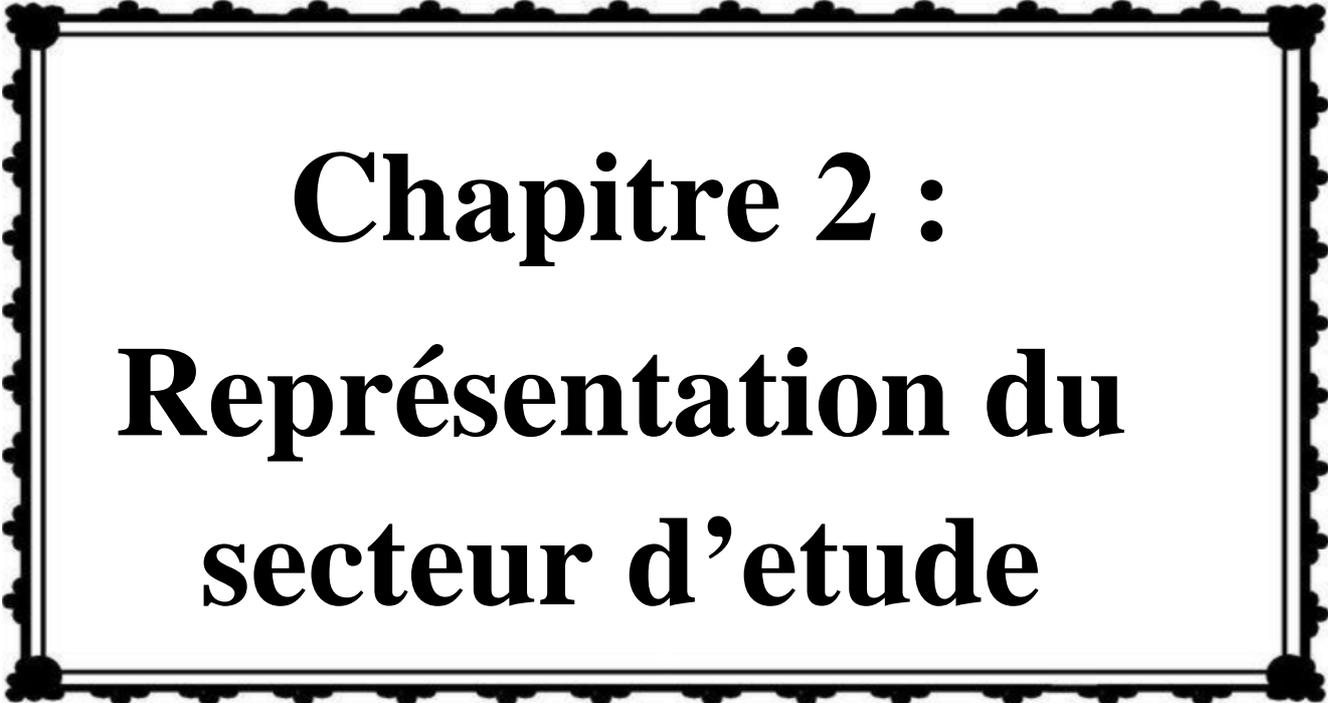
Ces résultats des différentes approches méthodologiques des principaux indices de la sécheresse aident à une description d'état de préparation de gestion de la sécheresse en Algérie. Par ailleurs, plusieurs efforts pour le développement de nouvelles méthodologies d'estimation et de quantification des différents aspects liés à la sécheresse ont été déployés, tel que les différences spatiales de la sécheresse [76], la prédiction des sécheresses par les indices de la circulation atmosphérique [77], et la mitigation des effets de la sécheresse [78] Cependant, plus d'efforts ont été fournis pour développer des indices de la sécheresse, permettant une identification précoce de son intensité et son ampleur. Ces indices sont primordiaux pour l'analyse et la planification continue des sécheresses dans le temps et dans l'espace [79]

Depuis 1994, prenant conscience des dégâts provoqués par les événements de sécheresse répétés dans l'État du Chihuahua au Mexique, les décideurs, les politiques, les scientifiques et les universitaires se sont concertés et leurs efforts ont abouti à la création du Centre de recherche sur la Sécheresse [80]. Le but du centre NDMC (National drought mitigation center) développé aux Etats-Unis d'Amérique est de rassembler, mesurer, et cartographier les impacts de la sécheresse et fournir aux rapporteurs un accès aux résultats à travers des outils de recherche faciles et interactifs. Les utilisateurs peuvent soumettre leurs propres rapports des impacts de la sécheresse. Dans le même contexte, d'autre pays tels que le Canada, l'Italie,

l'Espagne,..., ont développés des centres de mitigation et de planning semblables pour une meilleure compréhension et analyse du phénomène.

Récemment, le programme « MEDROPLAN » *Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning* a été développé par l'Europe AidCo-operation Office avec la collaboration de scientifiques et d'acteurs de l'eau de Chypre, Espagne, Grèce, Italie, Maroc et Tunisie, comme initiative pour la préparation de directives de gestion et de mitigation des sécheresses dans les pays méditerranéens. Le guide permet de fournir une approche efficace et systématique pour mettre au point des plans de gestion de la sécheresse alliant science et politique.

Donc préparer un guide pratique de gestion de la sécheresse, en adaptant une méthodologie basée essentiellement sur l'expérience Algérienne, et celle des autres pays, tout en prenant en considération les connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques acquises dans ce domaine est nécessaire. Or, la sécheresse fait partie du climat [81], et les statistiques communément disponibles pour analyser les variables qui sont à l'origine des sécheresses, telles que, les précipitations ou les séries de débits, sont basées sur l'étude fréquentielle des étiages, l'étude des séries temporelles, la genèse de données synthétiques, la théorie des séquences, la régression multiple, etc. Cependant, on trouve dans la littérature toute une pléthore d'ouvrages sur le sujet. Si depuis des décennies, les lois statistiques classiques ont fait le bonheur des hydrologues statisticiens, aménageurs, concepteurs et autres, aujourd'hui, un constat amer se pose : toutes ces lois classiques, souvent utilisées abusivement, trouvent des limites dans l'étude des événements d'occurrence rare. Des études récentes [36] ont montré que la loi de Laplace-Gauss qui est la plus utilisée pour la modélisation statistique des pluies annuelles, mais aussi toutes les autres lois à décroissance exponentielle, ne permettent pas d'ajuster d'une façon satisfaisante les queues de distribution des séries longues. Donc, il est important de modéliser les précipitations maximales probables afin de les utiliser dans la prévision des crues extrêmes telle que dans la gestion des inondations.



Chapitre 2 :
Représentation du
secteur d'étude

I. Introduction :

Le bassin de la Seybouse est l'un des plus grands bassins hydrographiques en Algérie est situé dans la région Nord Est de l'Algérie et s'étend sur une Superficie de 6471 Km² et leur principales affluents : L'oued Cherf, L'oued Bouhamdane, La Moyenne Seybouse et L'oued Mellah est le principal affluent de rive droite de la Seybouse plus de 50% avec laquelle il conflue au débouché de la vallée de Guelma.

II. Cadre géographique :

II.1. Situation Géographique :

Le bassin versant de l'Oued Mellah fait partie de l'ensemble du grand bassin versant de l'Oued Seybouse. Il se dessine entre les latitudes 36° 07' et 36° 23' et longitudes 7° 40' et 8° 04' Est. En outre, le bassin de l'Oued Mellah est limité :

- Au nord par la daïra de Bouchegouf et au Nord-Ouest par DjbelNadour.
- Au Sud par la daïra de Sedrata et au Sud-Est par la wilaya de Souk Ahras.
- A l'Est par Bouhadjar et à l'Ouest par la commune de ben Smih.

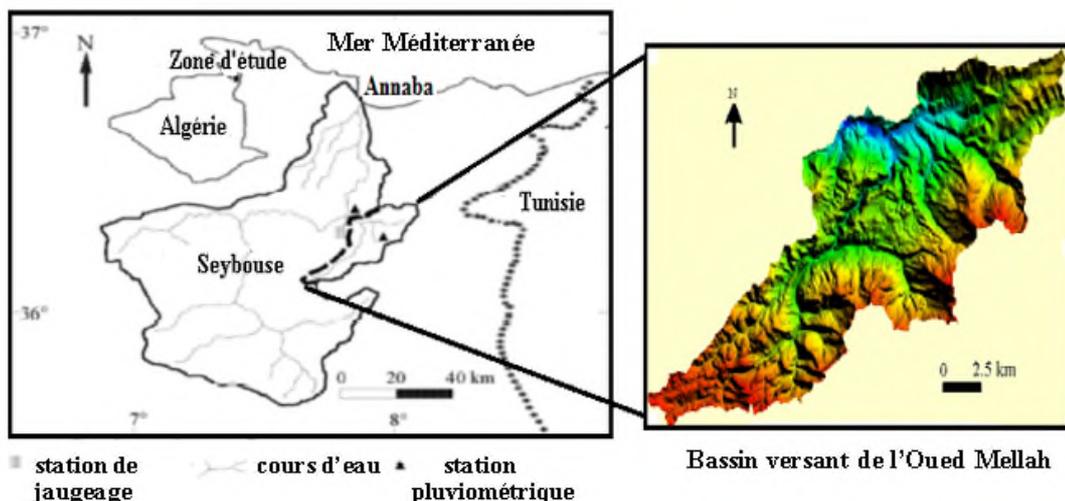


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant de l'Oued Mellah.

Le bassin, contrôlé par la station hydrométrique de Bouchegouf se situe à l'est de la moyenne Seybouse et occupe une superficie de 550 km². Il est en forme allongée d'une orientation Sud-Ouest – Nord-Est et une topographie très hétérogène. Le cours d'eau principal de l'Oued Mellah est formé de la réunion de l'Oued Sfa et de l'Oued Rarem. Ce dernier présente dans son cours supérieur une direction Sud-Ouest – Nord-Est qui lui est imposé par le bombement triasique qu'il traverse au Djebel Nador et par le changement d'orientation des axes des plis. L'Oued Mellah est formé de la confluence des oueds Sekaka et Rirane qui traversent une région très accidentée aux versants fortement escarpés. L'Oued Sekaka est naît de la jonction de l'Oued R'biba et de l'Oued Hammam qui draine les eaux de la région de

Douar Aine Ketone. Le chevelu de l'Oued R'biba prend sa source d'une multitude de djebels et kefs aux sommets aigus, qui représentent pour la plupart la ligne de crêtes du bassin de l'Oued Mellah. Au sud-ouest, il y a Djebel Bardou (1261 m), au sud et sud-est apparaissent djebels Ras el Alia (1317 m), El Azega (1100 m), Tabaga (1227m) et Djebel Safiat el Aouied (1151 m). Quant à l'Oued Hammam, d'une orientation Sud-Ouest - Nord-Est, ces drains sont naît de Djebel Schvara (864 m) situé au Nord-Ouest et des djebels Zouara (1292 m), Bou Aichoun (1102 m) et Besbessa (963 m) positionnés au sud-est du bassin.

L'Oued Rirane et ses affluents, suivant une direction Sud-Est - Nord-Ouest, traversent un ensemble de reliefs montagneux fortement cerné par les ravines. Ces massifs qui forment une partie de la limite Sud du bassin, se définissent essentiellement par Djebel El Koutz (1031 m), Kef Djaffara (1054 m), Djebel Safiet el Aouied (1151 m) et Djebel Kelaia (1284 m). A l'opposé de l'Oued Ranem, on distingue l'Oued Sfa et ses principaux affluents marqués par les oueds Aouassia, Meza et Bouredine. La réunion de ces deux derniers forment l'Oued Sfa, d'une orientation Est - Ouest. Entre autres, les affluents de cet oued sont entaillés dans des chaînons au relief modéré et au couvert végétal plus au moins dégradé, parmi lesquels on distingue du nord au nord-est Djebel Aine Kasbah (798 m), Ras Bab el Kef (795 m) et Kef er Remoul (797 m). En outre, s'étendant le long de la limite sud, sud-est et est, les monts de Melaab (1093 m), El Mahbouba (1262 m) et Regzoune (1148 m) se caractérisent par des volumes aérés de moindre importance introduits par des chevelus moins denses issus des oueds Meza et Aouassia.

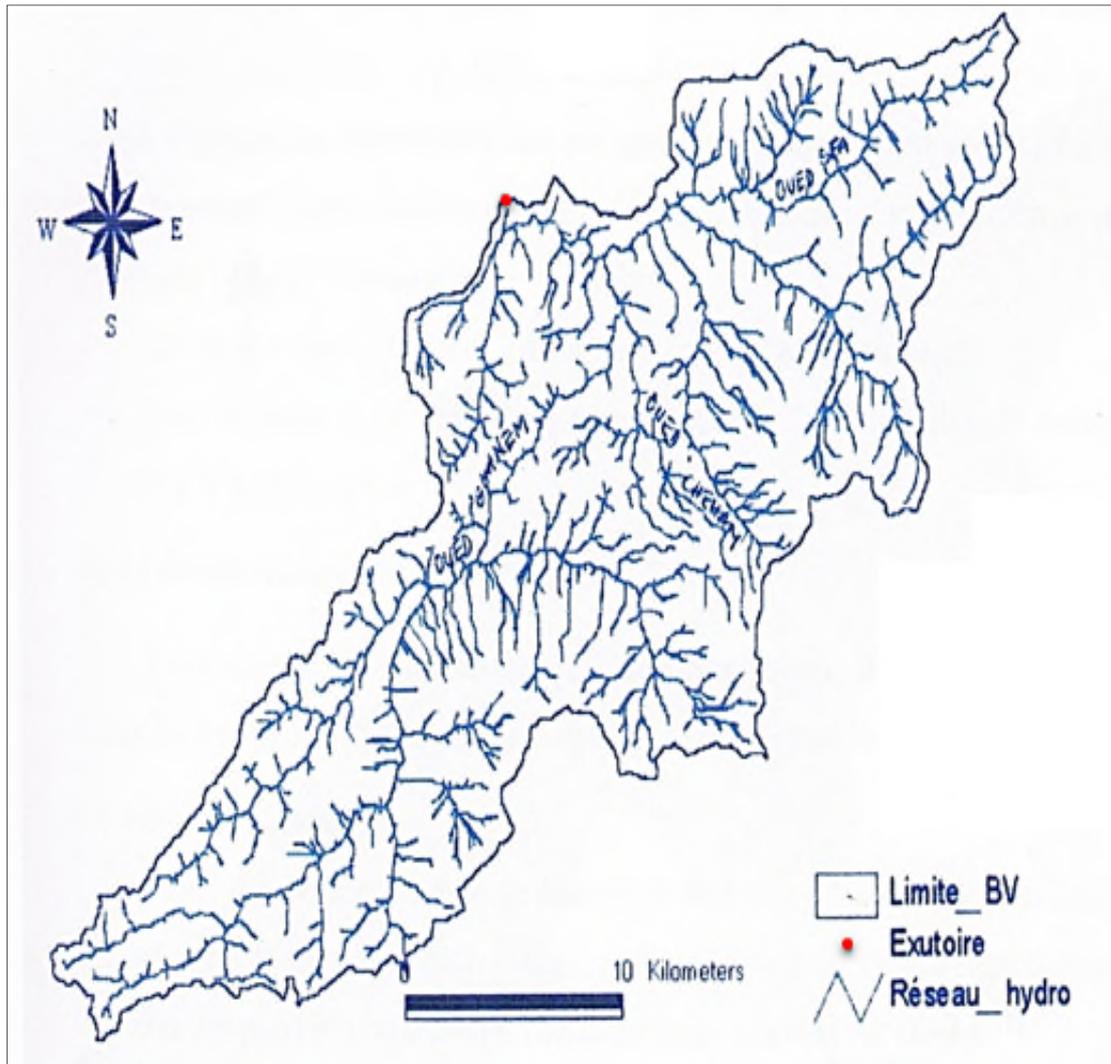


Figure 2 : carte du réseau hydrographique de l'Oued Mellah.[99]

II.2. Relief et climat :

Le bassin versant de l'Oued Mellah est grossièrement dominé par un relief accidenté qui a subi des encaissements plus ou moins profonds. Les altitudes varient entre 100m et 1295m. La région de Bouchegouf possède un climat de type méditerranéen, caractérisée par deux saisons bien distinctes une saison sèche allant du mois de Mai jusqu'au mois de d'Octobre avec des températures élevés particulièrement en Juillet et Août et une saison humide allant d'Octobre jusqu'à Mai.

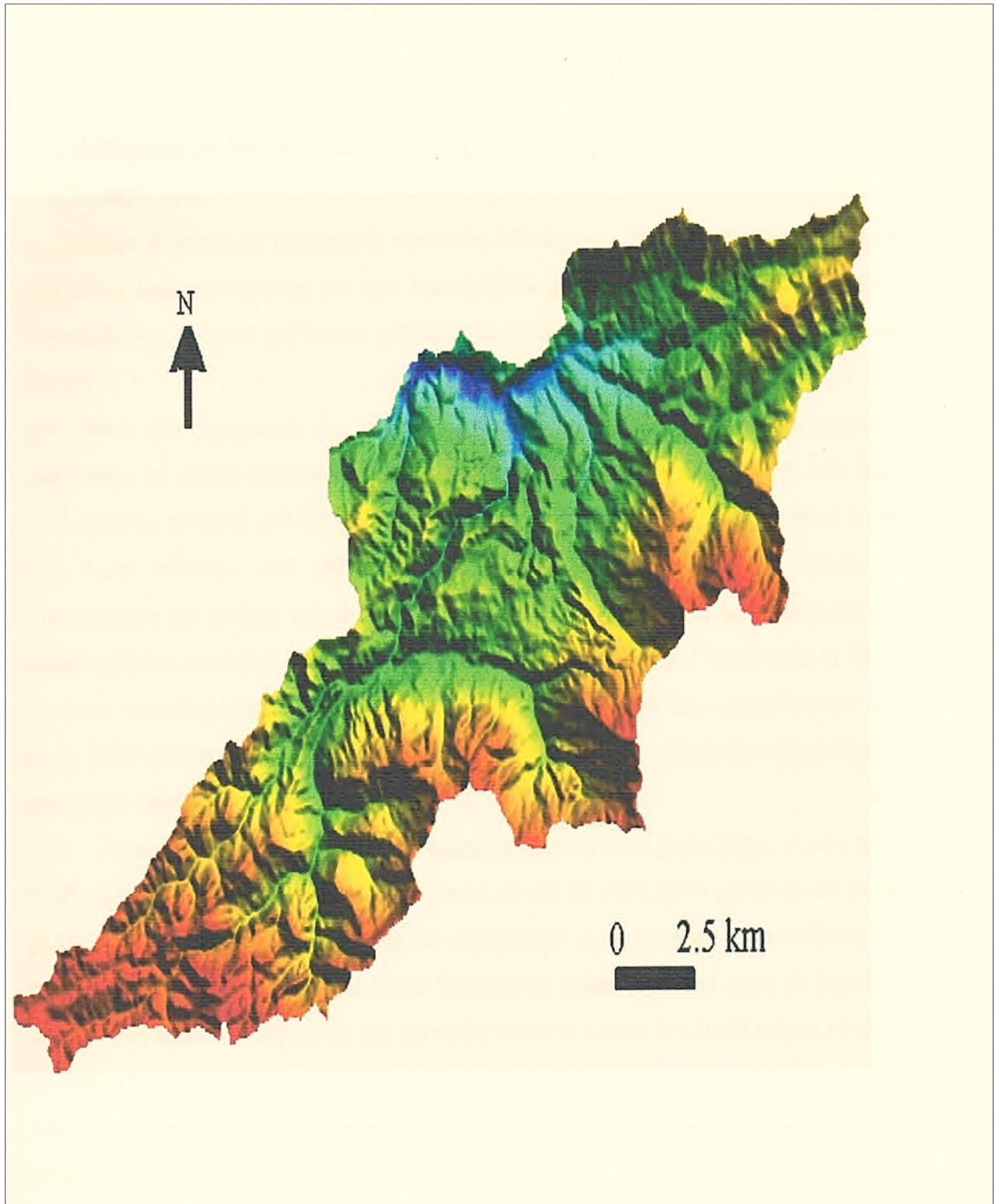


Figure 3 : carte du relief du bassin versant de l'Oued Mellah.[99]

III. Géologie du bassin versant de l'Oued Mellah :

III.1. La lithologie :

Elle est dominée par trois grands ensembles lithologiques qui ne correspondent pas toujours aux zones hydrogéologiques, au Sud, l'oued Rbiba qui devient l'oued Sekaka en aval et l'oued Ghirane, drainent des bassins versants constitués de calcaire hydrésiens et de marnes et marno-calcaires.

Au contact des calcaires et des assises marneuses, une réserve aquifère s'est constituée, comportant un niveau d'émergence à leur base. Ces formations se poursuivent vers l'est de sorte qu'il est probable que les eaux d'infiltration des calcaires hydrésiens du djebelkebaia. Ces bancs calcaires sont suffisamment importants et perméables pour assurer une régularisation des niveaux aquifères en débit de leur forte fissuration. Le secteur amont du Mellah peut être considéré comme un « château d'eau » de la région. L'oued Rbiba et Ghirane prennent leurs sources dans cette zone. Les débits pérennes sont estimés respectivement à 300 l/s et 150 l/s (service hydraulique de Guelma), c'est à partir de ces mêmes formations aquifères que l'oued Medjerda prend sa source.

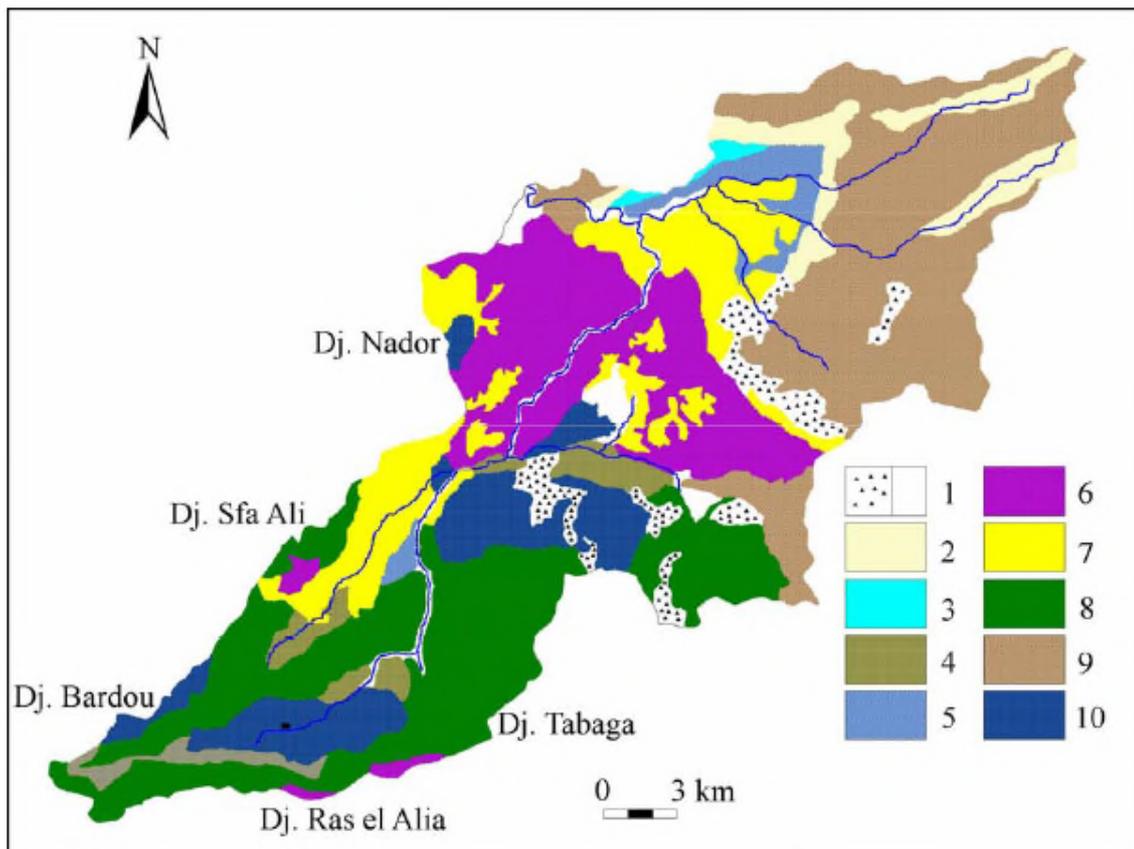


Figure 4 : Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Mellah[99].1-Formation superficielles, éboulis de pentes ,triangles,alluvions :teinte blanche) ;2-Argiles sous-numidiennes (oligocène) ;3-Marnes (Barrémien) ;4-argiles gréseuses et conglomératique (Miocène) ;5-marno-calcaires (crétacé) ;6-l'ensemble triasique

(argiles à gypse, marnes et calcaires) ;7-conglomérats (moi-pliocène) ;8-calcaire et marnes (sénonien supérieur) ;9-grès numidiens (oligocène) ;10-calcaire(créacé)

Au centre, le trias domaine, il est constitué d'argiles et de gypse broyé, il joue un rôle fondamental par son extension et sa forte teneur en sel. En effet, la fréquence de cet élément dont l'incidence sur la qualité des eaux de ruissellement et d'infiltration est très néfaste et ne permet pas l'utilisation de l'eau de l'oued Seybouse en saison sèche, au cours de laquelle les besoins sont accrus. La région est peu perméable seule la source de Ghaabet Oued Cheham à un débit appréciable.

Les alluvions des terrasses de Bouchegouf semblent plus argileuses que celles de Guelma. Elles sont moyennement perméables.

Les colluvions se trouvent surtout au pied des massifs calcaireux et gréseux au même au pied des calcaires marneux. Ils sont le résultat de l'altération mécanique des roches ou le produit sera déplacé vers le bas sous l'effet de la gravitation, mais parfois transporté par des mouvements de masse et de ruissellement de surface.

III.2. Analyses stratigraphiques et tectoniques :

La région d'étude présente de grands plissements d'orientation sud-ouest nord-est avec des zones d'effondrements de la structure synclinale et anticlinale. Ce bassin est constitué essentiellement du Trias, Crétacé, et du Miocène. Les calcaires de l'Aptien sont frappés par une tectonique bouleversante due probablement au diapirisme triasique. Les mouvements du Tertiaire ont façonné de relief du Tell.

III.2.1. La stratigraphie :

Les formations du Trias forment dans le bassin une série d'affleurement qui comprend des marnes, des argiles, du gypse et des dolomies présentées sous forme de bancs disloqués.

Le créacé est presque identique dans le bassin versant de l'oued Mellah. Le créacé inférieur est marqué par l'aptien et le vraconien qui englobe les marnes gréseuses sont d'âge albien. En outre, les faciès du cénomanien appartenant au créacé supérieur montrent une sédimentation à dominance marneuse.

III.2.2. La tectonique :

Les grands plissements en zones d'effondrement sont des déformations produites à la phase eocène-miocène supérieure par le glissement des nappes telliennes [82].

Ceci est surtout le résultat d'une tectonique de compression durant la phase alpine, d'une tectonique de distorsion pendant la phase moi pliocène et enfin par le diapirisme du Trias.

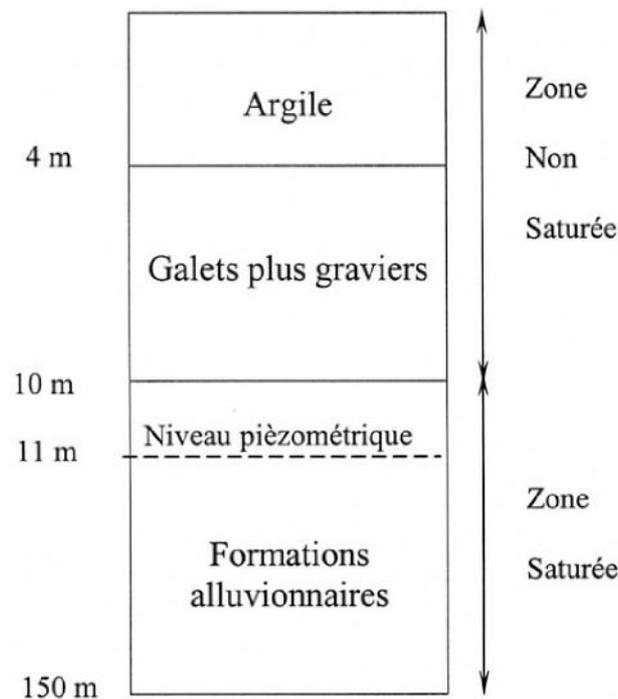


Figure 5: Coupe schématique illustrant la limitation de la Zone non saturée et la zone saturée dans la plaine de Bouchegouf. [83]

IV. Morphologie du bassin versant de l'Oued Mellah :

IV.1. Introduction :

Le bassin versant fonctionne comme un collecteur de précipitations qui vont se transformer en plusieurs types d'écoulements tout dépend des conditions climatiques, des caractéristiques morpho métriques (forme, relief, altitude, pente, réseau de drainage...etc) et la nature du sol ainsi que le couvert végétal. Les caractéristiques qui interviennent de façon combinée pour expliquer les modalités de l'écoulement, s'apprêtent à une analyse quantitative.

IV.2. Caractéristiques physiques du bassin :

Le bassin versant est un objet complexe dont l'ensemble des caractéristiques (géométriques, géologiques, physiographiques, humaines, etc...) joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certains d'entre elles (altitude), directement dans le processus de formation de la pluie. Il faut noter l'existence, à la surface du bassin versant, d'un système longitudinal, le réseau de drainage ou hydrographique, défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels.

Permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement. Ce réseau est plus ou moins développé selon différents facteurs (géologie, climat, pente du terrain, etc...) il ne manque pas dans la littérature scientifique de paramètres quantifiés

destinés à mesurer telle ou telle caractéristique des bassins versants. Ces facteurs d'ordre purement géométrique ou physique, s'estiment à aisément à partir de carte topographique ou en recourant à un modèle numérique de terrain.

IV.3. Caractéristiques morphométriques du bassin :

Pour mieux comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de l'Oued Mellah, il est impératif de connaître ces caractéristiques morphométriques (forme, relief, altitude, pente, densité de drainage) qui expliquent le cycle de transformation des pluies en écoulements et s'appêtent à une analyse quantifié.

➤ **La surface du bassin versant :**

La surface du bassin égale à 550 km² environ.

➤ **Le périmètre du bassin versant :**

Le périmètre du bassin versant estimé à 120 km.

Tableau 1 : surface et périmètre du bassin versant de l'Oued Mellah

Superficie (km ²)	Périmètre (km)
550	120

IV.3.1. Indice de compacité :

La forme du bassin versant qui influe sur l'écoulement globale et l'allure de l'hydrogramme des pluies est exprimée par l'indice ou le coefficient de compacité.[100]

De Gravellus donné par la formule suivante :

$$C = 0.28 P / \sqrt{S}$$

Avec :

C : Indice de compacité ;

P : Périmètre du bassin versant en km.

S : Superficie du bassin versant en km².

Ce coefficient est égal 1 lorsque le bassin versant est parfaitement circulaire. Il est égal à 1.12 dans le cas d'un bassin versant carré, et il peut atteindre la valeur 3 pour des bassins versants allongés.

Dans notre cas C=1.43 donc le bassin versant de l'Oued Mellah caractérise par la forme allongée. Cette valeur favorise de temps de concentration d'eau de ruissellement.

IV.3.2. Le rectangle équivalent :

Le rectangle équivalent est défini comme étant le rectangle de longueur (L) et de largeur (B) qui a la même surface (S) même périmètre (P), même indice de compacité (C) et même hypsométrie que le bassin versant étudié.[100]

Ce paramètre facilite la comparaison entre les bassins versants du point de vue de leur influence sur l'écoulement.

$$L = \frac{C \cdot \sqrt{S}}{1.128} \cdot \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

Avec :

C : indice de compacité ;

S : Superficie du bassin versant en km² ;

L : longueur du rectangle équivalent en km.

On obtient :

$$L = 48 \text{ km}$$

La largeur du rectangle "B" est déterminée en fonction de la surface du bassin versant "S" et la longueur du rectangle "L" : [100]

$$B = \frac{C \cdot \sqrt{S}}{1.128} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.128}{C} \right)^2} \right]$$

On obtient :

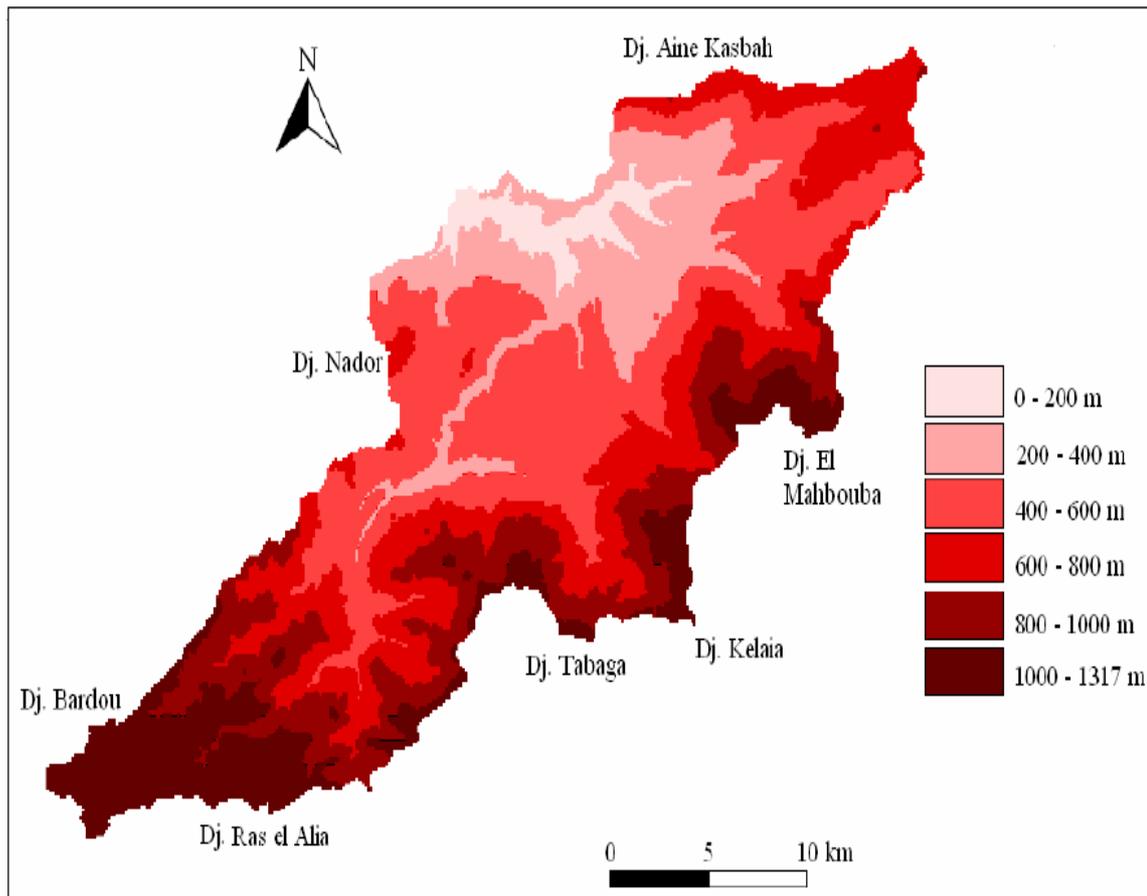
$$B = 11.46 \text{ Km.}$$

IV.3.3. Relief et courbe hypsométrique du bassin versant :

L'influence du relief sur l'écoulement de surface est chose évident il est souvent caractérisé par la courbe hypsométrique du bassin.

Les courbes hypsométrique est une caractéristique topographique du bassin versant. Elle exprime la répartition de la surface totale en fonction des altitudes.

Les courbes hypsométrique est considère comme une sorte de profil du bassin et sa pente moyenne en m/km^2 .



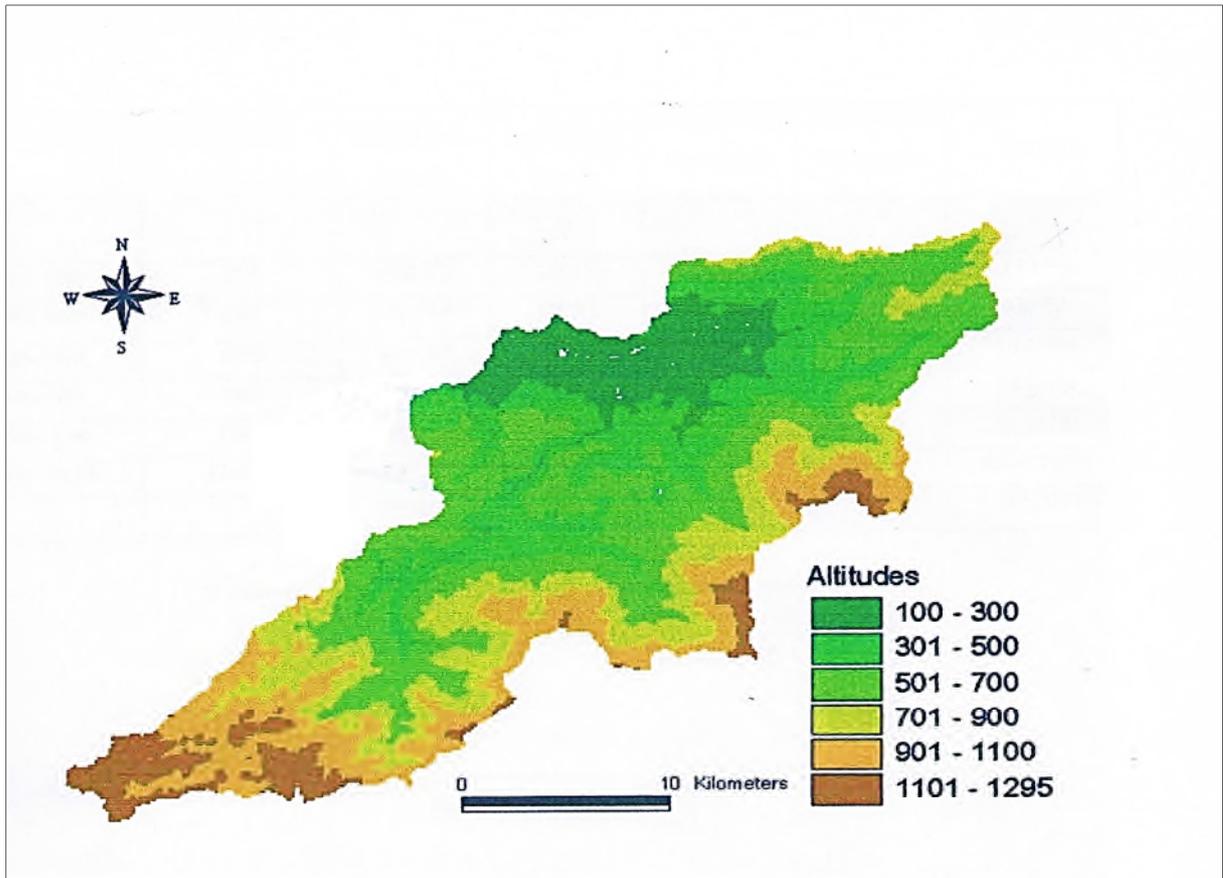


Figure 7 : Carte des altitudes du bassin versant de l'Oued Mellah. [99]

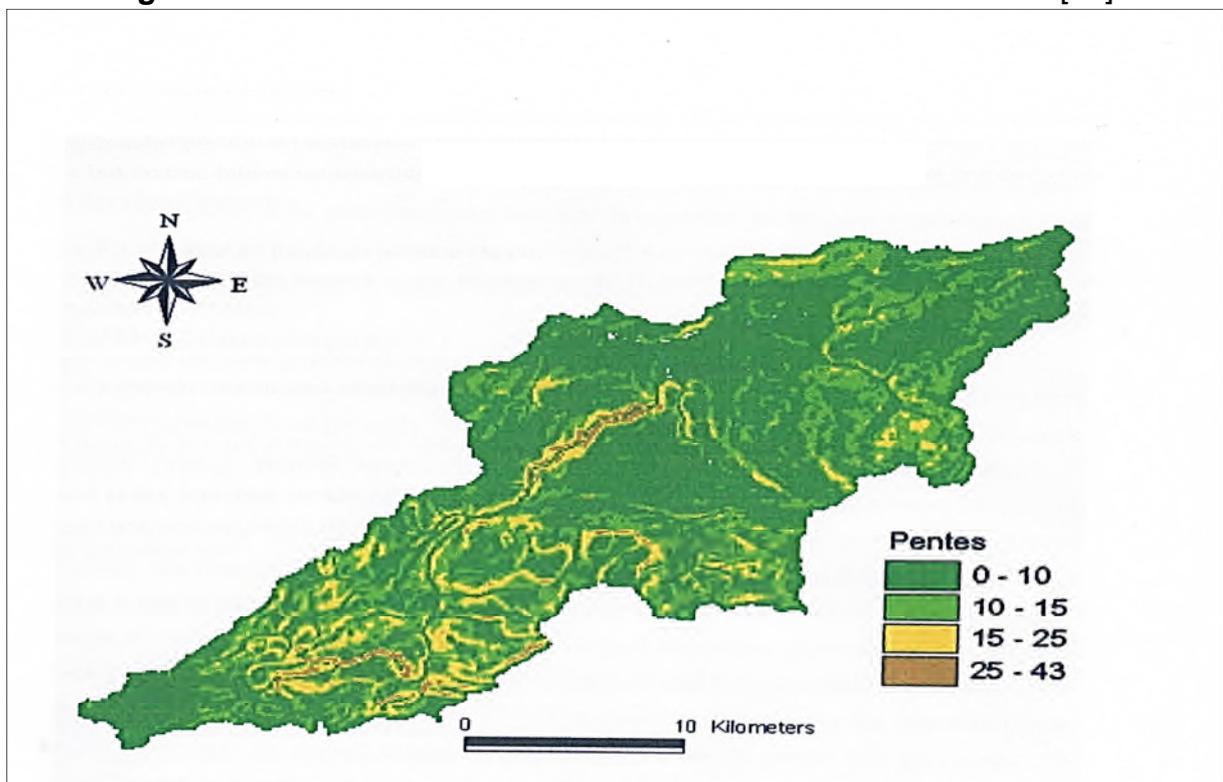


Figure 8 : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Mellah. [99]

Tableau 2 : Caractéristiques morphométriques de bassin versant de l'Oued Mellah (D'après [84] et Annales hydrologiques de l'A.N.R.H.)

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Surface	S	550	Km ²
Périmètre	P	120	m
Indice de compacité	C	1.43	-
Longueur du rectangle équivalent	Lé	48	km
Largueur du rectangle équivalent	B	11.46	km
Altitude minimale	H _{min}	95	m
Altitude maximale	H _{max}	1317	m
Altitude moyenne	H _{moy}	641	m
Altitude à 5% de la surface	H _{5%}	1118	m
Altitude à 95% de la surface	H _{95%}	295	m
Indice de pente de roche	Ip	0.15	-
Longueur du thalweg principal	Loued	53	m
Densité de drainage	Dd	4	Km/km ²
Coefficient de torrentialité	Ct	25.2	-

IV.3.4. Indice de pentes :

La détermination de la pente topographique permet la comparaison et la classification d'un bassin versant. Ces indices de la pente sont calculés à partir de la connaissance et de la répartition hypsométrique.

IV.3.4.1. Indice de pente globale :

Il est défini comme étant le rapport du dénivelé simple et de la longueur du rectangle équivalent.[100]

$$I_g = D/L$$

I_g : Indice de pente globale en m/km

D : dénivelé simple séparant les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin

L : longueur du rectangle équivalent en km

Ce qui donne :

$$I_g = 17.15 \text{ m/km}$$

IV.3.4.2. Indice de pente moyenne :

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Elle ne tient compte pas de la forme de la courbe hypsométrique[100]

H_{max}: altitude maximale du bassin (m) ;

H_{min}: altitude minimale du bassin (m) ;

L : longueur du rectangle équivalent en (m) ;

Ce qui donne :

$$I_{moy} = 25.46 \text{ m}$$

IV.3.4.3. La dénivelé spécifique :

La dénivelé spécifique ne dépend que de l'hypsométrie et de la forme du bassin versant.[100]

Elle est estimée à partir de la formule suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{S}$$

D_s : dénivelé spécifique en m

I_g : Indice de pente globale en m/km

$$D_s = 402.20$$

D'après la deuxième classification de l'ORSTOM (Office de Recherche Scientifique de Territoire d'Outre Mer), la dénivelé spécifique du bassin de Oued Mellah se trouve dans la classe R6, donc on a un relief fort.

Tableau 3: Classification de l'ORSTOM pour différents reliefs.

Classe	Type de relief	Intervalle de DS
R1	Relief très faible	D _s < 10 m
R2	Relief faible	10 m < D _s < 25 m
R3	Relief assez faible	25 m < D _s < 50 m
R4	Relief modéré	50 m < D _s < 100 m
R5	Relief assez fort	100 m < D _s < 250 m
R6	Relief fort	250 m < D _s < 500 m
R7	Relief très fort	D _s > 500 m

IV.3.4.4. Temps de concentration :

Le temps nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis l'élément hydrologiquement le plus éloigné (en amont) du bassin versant jusqu'à l'exutoire est appelé temps de concentration du bassin. Pour sa détermination on utilise souvent la formule de GIANDOTTI car elle tient compte des paramètres morphologiques utilisés : [100]

$$T_c = \frac{1.5L + 4\sqrt{S}}{0.8\sqrt{H_{\text{moy}} - H_{\text{min}}}}$$

T_c : temps de concentration (heure)

L : Longueur du cours principal du thalweg ($L=53\text{km}$) ;

S : Surface du bassin versant (km^2) ;

H_{moy} : altitude moyenne (m) ;

H_{min} : altitude minimale (m).

Donc : $T_c = 9\text{h } 16\text{min}$

IV.3.4.5. Vitesse de ruissellement :

Elle est donnée par la formule suivante : [100]

$$V_r = \frac{L_p}{T_c}$$

L_p : longueur de talweg principale en Km ;

T_c : temps de concentration en h.

D'où : $V_r = 5,78 \text{ Km/h}$.

Les caractéristiques du bassin versant de l'Oued Mellah sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 4: récapitulation des caractéristiques morphologiques de bassin versant de l'Oued Mellah

Paramètre	Valeur
Superficie (S) en km ²	550
Périmètre (P) en km	120
Indice de pente globale (I _g) m/km	17.15
Indice de pente moyenne (I _{moy}) en %	25.46
Dénivelé spécifique (Ds) en m/km	402.20
Temps de concentration (T _c) Heure	9h 16
Vitesse de ruissellement (V _r)	5.78

V. Couvert végétal

Le bassin de l'oued Mellah est le plus boisé (chêne liège), à cause des effets conjugués de l'altitude et de la pluviométrie. Selon [85], le taux de recouvrement de ce bassin est de 35%. Mais la répartition du couvert végétal est loin d'être simple, le même sous-bassin présente les trois types de couverture qui se différencient de l'amont à l'aval avec une prédominance des zones de cultures [86]

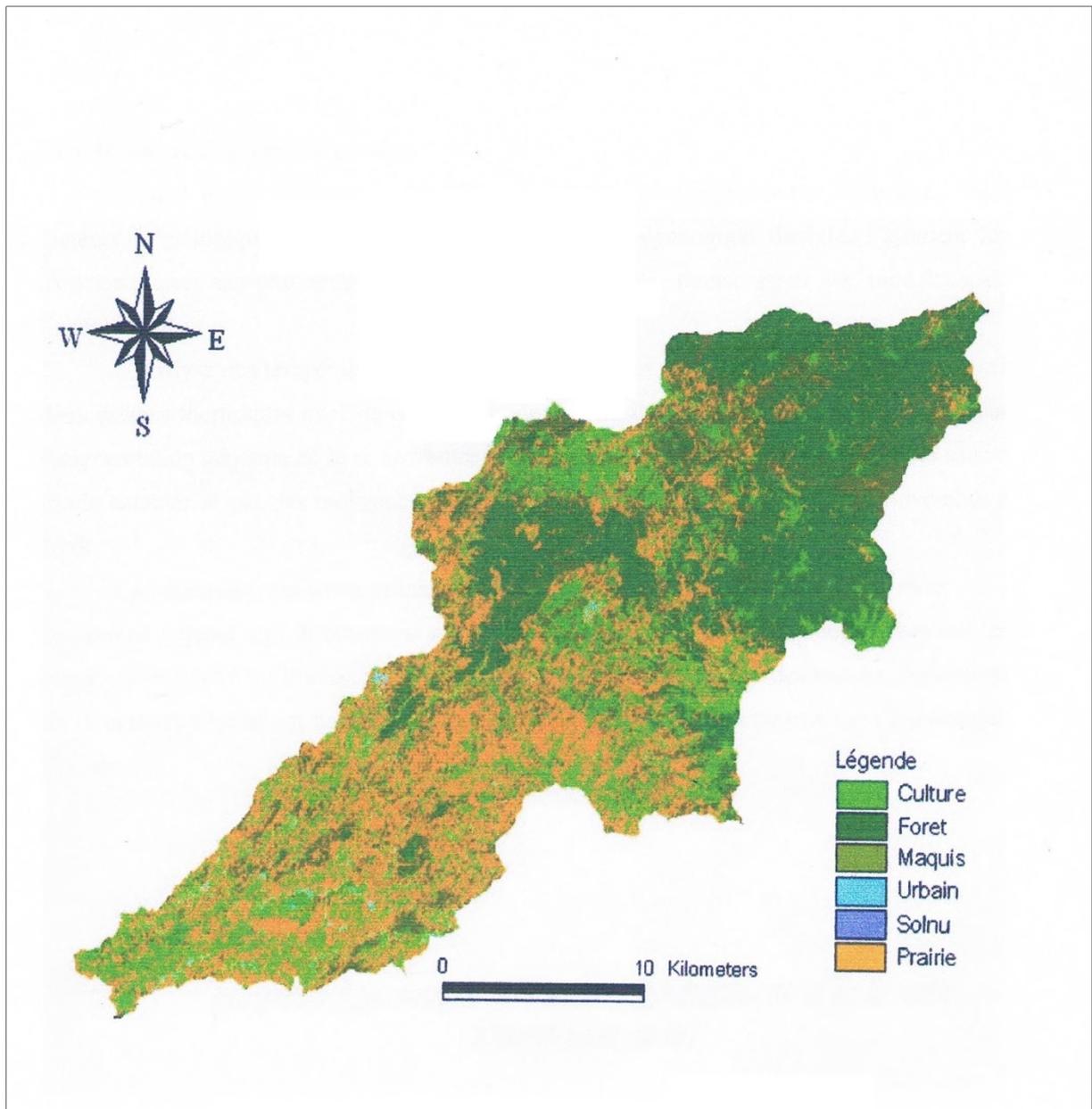
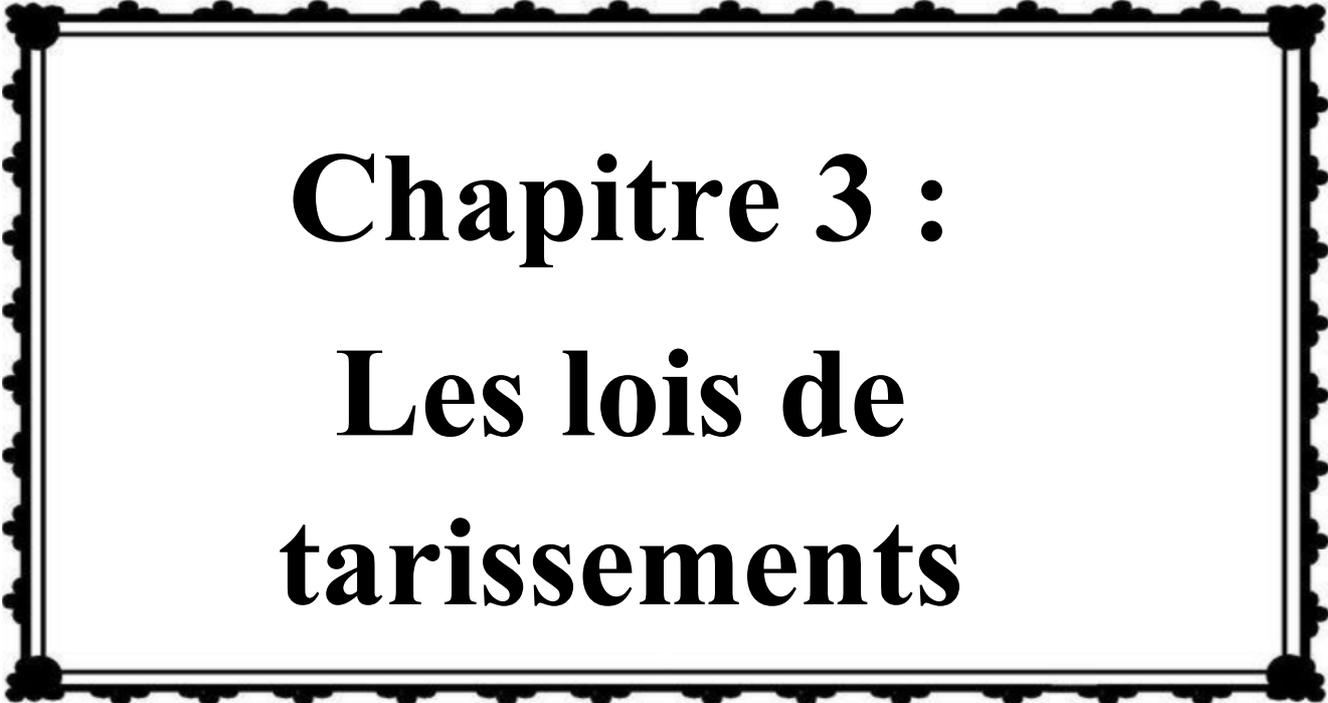


Figure 9 : la carte de couvert végétal du bassin versant de l'Oued Mellah.[99]



Chapitre 3 :
Les lois de
tarissements

I. Définition du tarissement :

Le tarissement représente la « phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorique et d'intervention humaine » [87]. Pendant une période non influencée par les précipitations le débit du cours d'eau provient uniquement des réservoirs souterrains ; par conséquent, on assimile théoriquement la décroissance des débits du cours d'eau durant ces périodes, à la vidange d'une nappe. [88] résume bien cet aspect car il définit le tarissement d'une rivière par « la décroissance des débits correspondant à la vidange des nappes en dehors de toute précipitation ». Ainsi, les lois qui régissent le tarissement des sources sont communément appliquées aux débits des cours d'eau.

I.1 La loi de Darcy :

En 1856, Darcy mis en place un dispositif expérimental (colonne de Darcy) afin de reproduire l'écoulement en milieu poreux. Il en conclut que « le volume débité est proportionnel à la charge et en raison inverse de l'épaisseur de la couche traversée » et en déduit la loi qui porte son nom et qui s'exprime par la formule suivante :[84]

$$Q = KA \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

Où : Q correspond au débit

A et L correspondent respectivement à la section et à la longueur de l'échantillon poreux.

$\frac{\Delta h}{L}$ Correspond au gradient hydraulique, où Δh est la différence des hauteurs piézométriques en amont et en aval de l'échantillon.

K correspond à la conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité du milieu poreux.

La théorie de la vidange des nappes souterraines est directement liée à celle de l'écoulement dans la nappe, qui s'appuie sur la loi de Darcy. Le débit de la nappe est donc proportionnel à sa charge, ce qui signifie que plus la nappe est haute, plus le débit est fort, et inversement, plus la nappe est basse, plus son débit diminue. Il est ainsi généralement admis que les courbes de décroissance des débits, qui expriment la relation entre le débit et le temps en régime non influencé par les pluies, sont des exponentielles décroissantes. Durant les phases de tarissement, le débit des cours d'eau décroît régulièrement avec le temps et cette décroissance est de moins en moins rapide. Mais l'analyse des tarissements a fait l'objet d'investigations depuis plus de 100

ans [89,90], cités par [91] et les formules proposées dans la littérature sont très nombreuses. Celles-ci sont généralement dérivées des travaux de Boussinesq [91,92]

I.2. Lois de tarissement : les travaux de Boussinesq :

Boussinesq s'impose en précurseur pour l'analyse des courbes de tarissement. Il considère que la forme de la courbe de décroissance des débits, en régime non influencé, est directement liée aux propriétés hydrodynamiques de l'aquifère. Il propose en 1877 l'équation différentielle suivante :[90]

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{\varphi} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2)$$

Où : K = conductivité hydraulique

φ = porosité efficace de l'aquifère

h = charge hydraulique

t = temps

Mais cette équation est non linéaire et difficile à résoudre. Il choisit donc de la linéariser pour aboutir à une fonction plus simple du type :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (3)$$

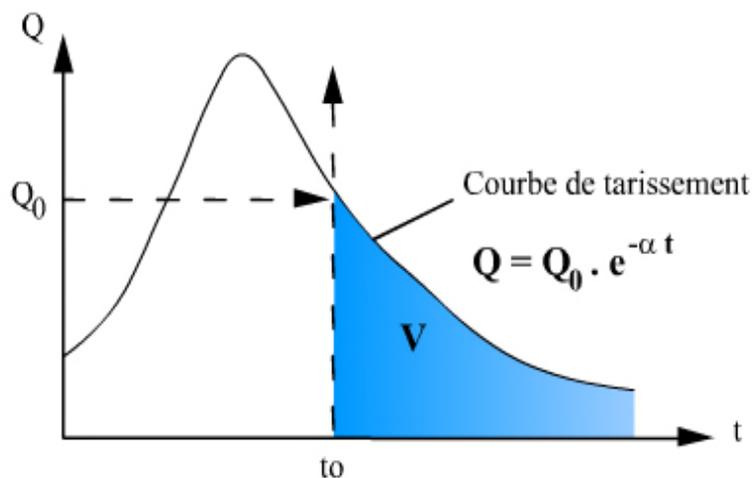


Figure 10 : Courbe de tarissement, période et segment

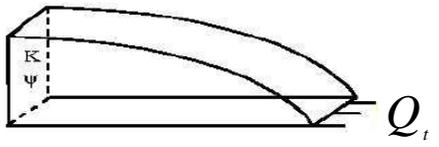
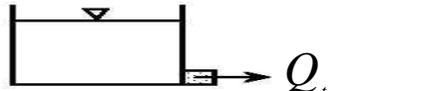
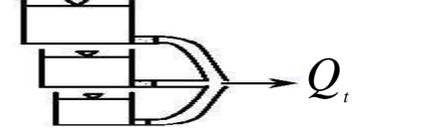
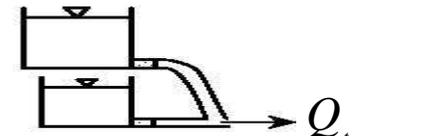
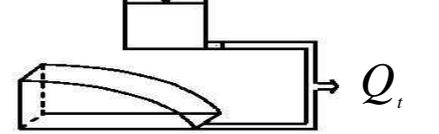
Où Q_t est le débit de tarissement au temps t , Q_0 est le débit initial de la période de tarissement, α est le coefficient de tarissement.

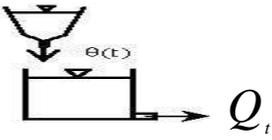
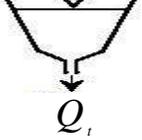
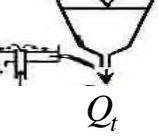
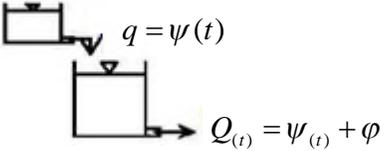
I.3. Autres lois pour l'analyse du tarissement :

La courbe de tarissement peut parfois être affectée par des ruptures de pentes, ou ne pas suivre la même loi de décroissance d'un bout à l'autre. En décomposant la courbe en tronçons, on obtient alors des coefficients de tarissement différents. Certains auteurs assimilent ce phénomène à la vidange conjointe, ou successive, de plusieurs nappes. Différentes formules ont été proposées pour pallier ce problème d'effet cumulatif de réservoirs (Tableau 5).

Le tableau 5 [92] présente une synthèse des principales lois de tarissement.

Tableau 5 : Les principales lois de tarissement

Auteur	Schématisation de l'aquifère	Loi de tarissement
Boussinesq (1903) Tison (1960)		$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)}$
Maillet (1905)		$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$
Barnes (1939) Schoeller (1948)		$Q_t = \sum_{i=1}^n Q_{0i} e^{-\alpha_i t}$
Horton (1933)		$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t^m}$
Ishihara et Takagi (1965)		$Q_t = Q_0 e^{(-t/c)} + Q_0 (1 + \alpha t)^{-2}$

<p>Samani et Ebrahimi (1996)</p>		$Q_t = \phi t + \theta t$ $\phi t = q_{ro} e^{-\alpha t}$ $\theta t = (Q_0 - q_{ro}) [1 + (n-1)\alpha t]^{n/(1-n)}$
<p>Coutagne (1948)</p>		$Q_t = Q_0 [1 + (n-1)\alpha t]^{n/(1-n)}$
<p>Padilla et al. (1994)</p>		$Q_t = (Q_0 - Q_c) [1 + (n-1)\alpha t]^{n/(1-n)} + Q_c$
<p>Mangin (1975)</p>		$Q_t = \psi(t) + \phi(t)$ $\phi(t) = q_{ro} e^{-\alpha t}$ $\psi(t) = q_0 \frac{1 - n t}{1 + \epsilon t}$

I.4. Préférence pour les lois simples :

Les lois qui régissent la décroissance des débits en régime non influencé sont donc nombreuses. Les fonctions utilisables se résument aux lois exponentielles de Maillet. Pour ce travail, la fonction de Maillet est préférée car elle montre les meilleurs ajustements. En outre, il s'agit de la loi communément admise pour l'analyse du tarissement des cours d'eau. De plus, la fonction de Tison constitue une formulation qui permet d'ajuster tous les débits décroissants depuis la décrue jusqu'au tarissement, mais cette loi ne permet pas de distinguer la rupture dans la décroissance des débits qui peut aider à identifier le début du tarissement.

II. Recharge - Définition et concepts de la variabilité

II.1. Recharge - Définition et concepts :

La recharge des eaux souterraines peut être définie dans un sens large comme «une addition d'eau à un réservoir d'eau souterraine". Quatre principaux modes de recharge peuvent être distingués :

- Écoulement d'eau vers le bas à travers la zone non saturée pour atteindre la nappe phréatique ;

- Écoulement latéral et/ou vertical d'inter-aquifère ;
- Recharge induite de proximité des eaux de surface résultant de l'abstraction d'eau souterraine ;
- La réalimentation artificielle telle que l'injection de forage ou par l'infiltration synthétique.

Dans cette étude nous nous concentrons sur le premier mode : la recharge naturelle par un écoulement d'eau vers le bas à travers la zone non saturée, qui est généralement le plus important mode de recharge dans les zones arides et semi arides.

II.2. Mécanismes de recharge :

Selon [93], les principaux mécanismes de recharge souterraine se conceptualisent de trois façons :

- **Recharge directe** : l'eau qui s'infiltré dans l'aquifère soit par l'excédent de l'humidité du sol ou par percolation verticale, et ce à travers la zone non saturée,
- **Recharge indirecte** : l'eau qui s'infiltré jusqu'au niveau hydrostatique par percolation à travers la zone non saturée,
- **Recharge localisée** : forme intermédiaire de recharge souterraine résultant de l'eau qui s'infiltré de façon horizontale à la surface en l'absence de canal défini.

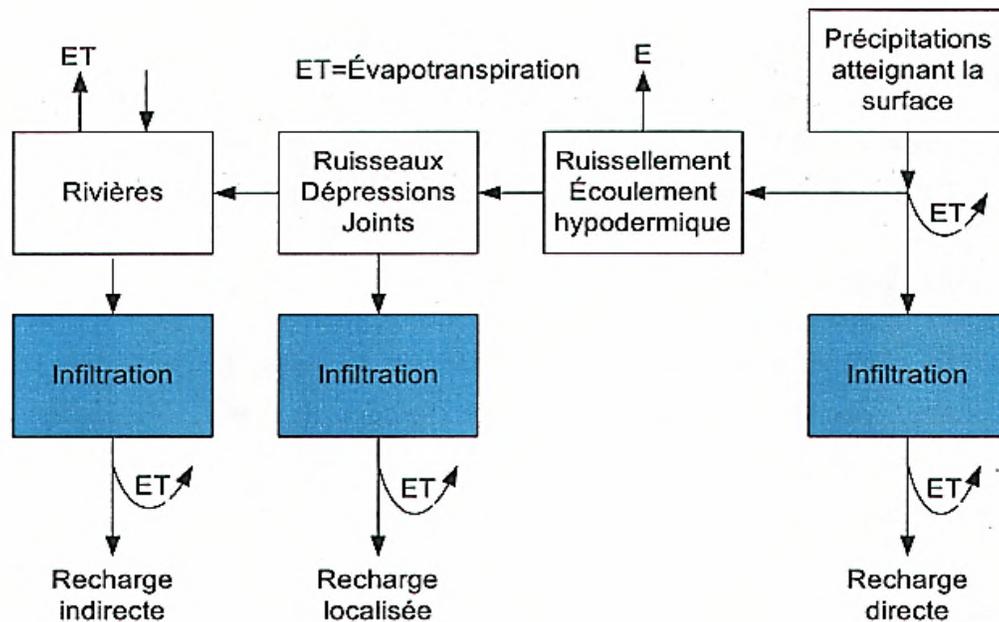


Figure 11 : les différents mécanismes de recharge selon [94]

La figure 11 : provenant de [94] est une expression simplifiée des mécanismes de recharge. La plupart du temps, une combinaison des différents mécanismes s'impose dans une seule situation par percolation selon un ou plusieurs procédés tels que : (1) la percolation diffuse ; (2) L'écoulement par macro-pores (fentes de retrait, fissures, fentes venant de racines) ou (3) l'écoulement préférentiel causé par la différenciation des caractéristiques physiques d'un sol.

II.3. La variabilité spatiale et temporelle de recharge :

La détermination de la recharge des eaux souterraines dans les zones arides et semi-arides n'est ni simple ni facile. Ceci est une conséquence de la variabilité temporelle des précipitations dans les climats arides et semi-arides, et la variabilité spatiale des caractéristiques du sol, la topographie et la végétation [93].

En outre, les montants de recharge sont généralement petits en comparaison avec la résolution des méthodes d'enquête.

III. Aperçu des méthodes d'estimation de la recharge :

Il existe autant de méthodes disponibles pour quantifier la recharge des eaux souterraines comme il existe différentes sources et processus de recharge. Chacune de ces méthodes a ses propres limites en termes d'applicabilité et la fiabilité. L'objectif de l'étude de recharge devrait être connue avant le choix de la méthode appropriée pour quantifier la recharge des eaux souterraines peut dicter l'espace requis et les échelles de temps exigés des estimations de la recharge [95]. Les évaluations des ressources en eau, par exemple, aurait besoin de renseignements sur la recharge à de grandes échelles spatiales et temporelles alors que les évaluations de la vulnérabilité des aquifères à la pollution exigeraient des informations plus détaillées à des échelles de temps plus courtes et locales.

Le classement idéal des méthodes d'estimation de la recharge pour accueillir tous les critères mentionnés ci-dessus sont :

III.1. La méthode du bilan hydrique :

La méthode la plus utilisée pour estimer la recharge est probablement le bilan hydrique. Le bilan hydrique peut être décortiqué en plusieurs sous-éléments mais l'équation de base (4) sur l'ensemble d'un bassin versant peut s'écrire comme suit :[84]

$$\Delta S = P - ET - Q_{out}^{GW} + Q_{in}^{GW} + I - R - Q \quad (4)$$

ΔS = Taux de changement de l'emmagasinement

P = Précipitation incluant l'irrigation

ET = L'évapotranspiration

Q^{GW}_{out} = Ecoulement de l'eau souterraine / extérieur du bassin

Q^{GW}_{in} = Ecoulement de l'eau souterraine / intérieur du bassin

I = Infiltration

R = Ruissellement de surface et hypodermique, Résurgence

Q = Ecoulement en rivière

L'équation (5) est une autre façon de formuler ce bilan hydrique en isolant le terme de recharge. Cette équation fait seulement état que toute l'eau qui arrive à surface de saturation s'écoule par écoulement souterrain, par résurgence, par évapotranspiration ou bien est retenue par emmagasinement.[84]

$$\Delta S^{GW} = I + Q^{GW}_{in} - Q^{GW}_{out} - Q^{Bf} - ET \quad (5)$$

ΔS^{GW} = Taux de changement de l'emmagasinement de l'eau souterraine

I = Infiltration

Q^{Bf} = Ecoulement provenant du débit de base ou de la résurgence

La méthode la plus commune pour estimer la recharge par bilan hydrique est la méthode indirecte ou l'approche résiduelle. Toutes les variables faisant partie du bilan, excepté R, sont mesurées ou estimées et R représente la somme. L'avantage principal de cette méthode est la flexibilité dans les ordres de grandeur de temps et d'espace. Les données variables peuvent provenir d'un lysimètre (échelle de résolution au centimètre et à la seconde) ou d'une analyse de changement climatique (échelle de résolution au kilomètre et à la décennie).

La seule limitation de la méthode résiduelle est l'incertitude dans la prise de mesure et l'estimation des paramètres pris en considération. Cette limitation peut devenir critique lorsque l'amplitude du taux de recharge est faible comparativement aux autres paramètres tels que l'évapotranspiration par exemple.

III.2. La méthode par l'étude des eaux de surface :

La méthode basée sur l'étude hydrologique (des eaux de surface) peut être utilisée lorsqu'il est question d'estimer la recharge. Les régions humides se caractérisent généralement par la création d'aquifères superficiels provenant de l'eau souterraine qui

se décharge habituellement dans les lacs et les rivières. L'inverse est observable dans les régions arides et semi-arides. Il est donc possible d'estimer la recharge en utilisant les données d'eau de surface en additionnant ou soustrayant les données des aquifères superficiels. Plusieurs autres techniques sont utilisées pour parvenir à l'estimation de la recharge telles que :

- Budget hydrique de chenal
 - ✓ La perte ou le gain de l'eau de surface peut être estimé en utilisant le budget hydrique de chenal basé sur les données de débits en rivière [93]
- Jaugeur d'infiltration
 - ✓ Les jaugeurs d'infiltration sont utilisés pour déterminer la différence de volume dans le réservoir d'un lac ou d'une rivière dans un laps de temps connu.
- Séparation de l'hydrogramme
 - ✓ La recharge d'eau souterraine peut être estimée en séparant l'écoulement de base de l'hydrogramme. Cette technique se base sur le bilan hydrique (équation 5).
- Par traceurs
 - ✓ La chaleur dans un cours d'eau peut être utilisée pour fournir des informations sur la vitesse et pour estimer l'infiltration.
 - ✓ Les isotopes stables de l'oxygène et l'hydrogène sont utilisés pour identifier la recharge d'eau souterraine des lacs et des rivières.
- Modèle analytique

Les modèles numériques peuvent estimer le taux de recharge sur l'ensemble d'un bassin versant. Parmi les plus courantes on recense :

- ✓ The recession curve displacement method (RCDM)(or *Rorabaugh Method*);
- ✓ Water Budget Method (WBM) [96];
- ✓ Seasonal Recession Method (SRM) (or *Meyboom Method*);

Cette revue des différentes techniques pour estimer la recharge des eaux souterraines rapporte que le moyen le plus simple et efficace est un combiné du bilan hydrique et du modèle numérique. En effet, il est possible d'estimer le taux de recharge sur un bassin versant sans avoir à installer des installations de prise de mesures et devoir entreprendre une longue campagne de relevés de données.

Dans la présente étude, nous nous sommes basés sur la méthode de [97], qui permet de calculer le volume d'eau souterraine qui se produit entre deux tarissements à partir des débits.

IV. Concept et principe de la méthode de Meyboom :

En 1961, le concept de la méthode de Meyboom a été dans un premier temps d'identifier une grande tendance de recharge (période préalablement sélectionné) dans un hydrogramme saisonnière semi-logarithmique sur une période de 12 mois, pour deux années consécutives ou plus (figure 12). L'hypothèse est que pour la décharge d'écoulement pendant la période de récession, la ligne de la tendance de récession serait contribué entièrement en eau souterraine. La recharge totale des eaux souterraines est alors calculée en utilisant le volume de la décharge potentielle totale d'eau souterraine au début de la récession, moins le volume de la décharge potentielle restant d'eau souterraine à la fin de la récession. Basé sur la figure 12, on peut dériver la décharge (Q) en tout temps (t) pendant la récession par :

(6)

Où :

$$Q = Q_0 / 10^{t/t_1}$$

Test le temps requis par le débit de base à s'écouler depuis le début et la fin de la récession, et Q_0 le débit de base au début de la récession. t_1 est le temps requis pour que le débit de base diminué, calculé par :

$$t_1 = (t_e - t_0) * 1.0 / \log(Q_0) - \log(Q_e) \quad (7)$$

Dans l'équation (7), t_e est le temps, Q_e est le débit à la fin de la récession, et t_0 le temps à son début. Dans l'équation (6), si l'on intègre la décharge Q sur une période de récession t , on obtient le volume total de décharge des eaux souterraines

$$Volume = \int_{t_0}^t Q dt = -(Q_0 t_1 / 2.3) / 10^{t/t_1} \quad (8)$$

Si l'équation (6) est intégrée à partir de l'instant t_0 à l'infini, le volume total de débit de base qui serait déchargée au cours d'une récession, peut être calculé. Ce volume est appelé décharge potentielle totale d'eau souterraine (Q_{tp}) est donnée par :

(9)

$$Q_{tp} = Q_0 t_1 / 2.3026$$

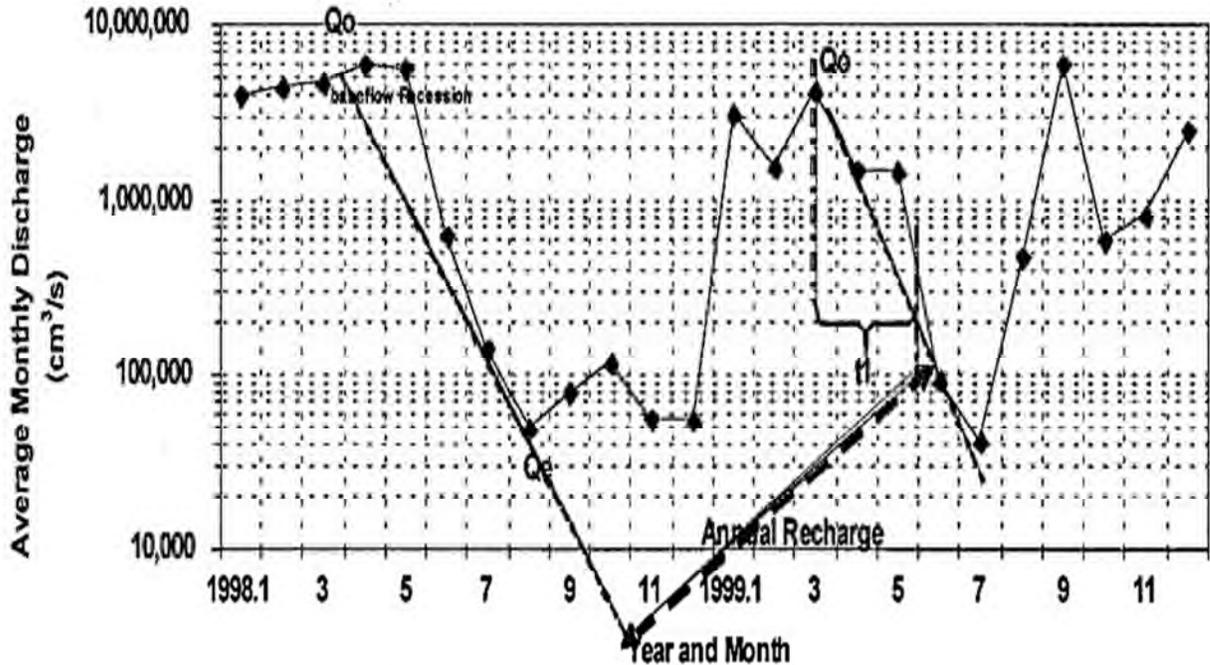


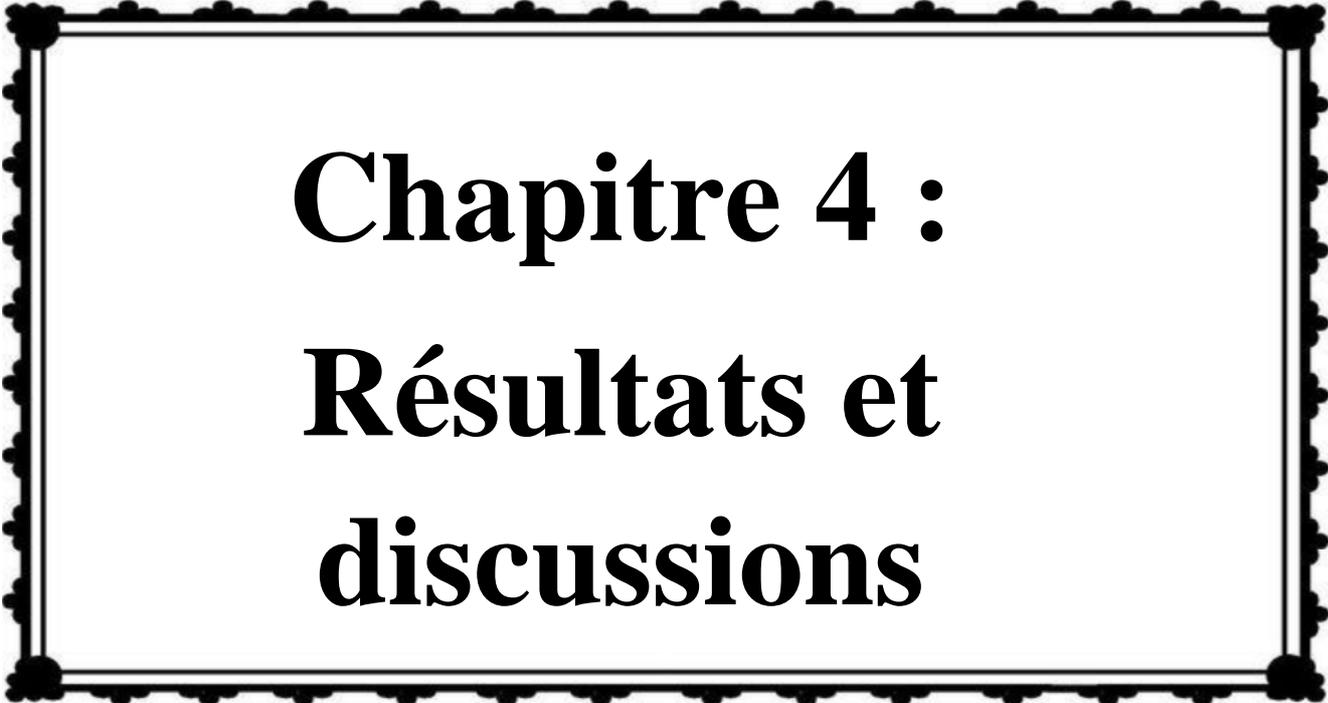
Figure 12 : Exemple d'un tracé semi-logarithmique de la méthode de Meyboon

En utilisant la décharge potentielle totale d'eau souterraine au début de la seconde récession, moins la décharge d'eau souterraine restant à la fin d'une récession donnée, on obtient le taux de recharge entre ces récessions :

$$Recharge = \frac{Q_{2nd_0} t_1}{2.3026} - Q_{remain} \quad (10)$$

Où Q_{2nd_0} est la décharge potentielle totale au début de la deuxième récession est Q_{remain} est la décharge restant à la fin de la première récession, calculé par :

$$Q_{remain} = (Q_0 t_1 / 2.3) - \left(\frac{Q_0 t_1 / 2.3}{10^{\frac{t}{t_1}}} \right) \quad (11)$$



Chapitre 4 : **Résultats et** **discussions**

I. Introduction:

Dans cette étude on dispose d'une série chronologique des débits à pas de temps journaliers mesuré dans la station hydrométrique de Bouchegouf à Oued Mellah.

Les données s'étalent sur la période 1977-2007 soit trente (30) ans. Le choix de ces périodes a été donc retenu en fonction des séries des données hydrométrique disponibles, en vue d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau souterraine du bassin versant de l'Oued Mellah.

Tableau 6 : Caractéristique de la station hydrométrique de Bouchegouf.

Oued- Station	Code	X	Y	Z	Période
O. Mellah-Bouchegouf	14 05 01	949.60	362.10	95	1977-2007

II. Analyse des coefficients de tarissement :

Les coefficients de tarissement moyens proportionnels à la vitesse de vidange de l'aquifère ont été déterminés au cours de la période 1977-2007. L'analyse de l'évolution des coefficients de tarissement ont été fait par régression exponentiel.

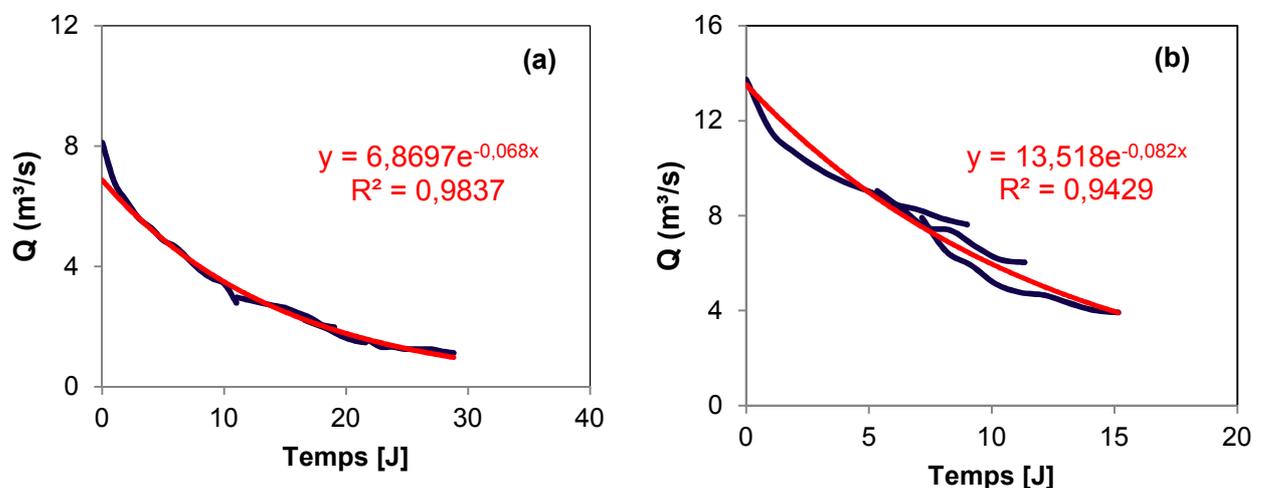


Figure13 : courbe du tarissement de la station de Bouchegouf : (a) 1977 et (b) 2007.

La figure 13 montre un exemple d'analyse de deux segments de tarissement pour deux années différentes, ainsi que la valeur du coefficient de tarissement.

Les valeurs des coefficients de tarissements obtenus par cette régression sont retenues durant la période de 1977-2007. La principale observation relève de l'importante variabilité des coefficients de tarissement pour le bassin de l'Oued Mellah. Le tableau 7 rassemble les valeurs du coefficient de tarissement α .

Tableau 7 : Variation du coefficient de tarissement α (j^{-1}) du bassin de l'Oued Mellah (1977-2007)

Année	α (j^{-1})						
1977	0,068	1987	0,053	1997	0,067	2007	0,082
1978	0,049	1988	0,077	1998	0,054		
1979	0,076	1989	0,066	1999	0,061		
1980	0,042	1990	0,092	2000	0,077		
1981	0,046	1991	0,079	2001	0,115		
1982	0,065	1992	0,067	2002	0,072		
1983	0,067	1993	0,099	2003	0,086		
1984	0,083	1994	0,087	2004	0,061		
1985	0,087	1995	0,113	2005	0,053		
1986	0,066	1996	0,097	2006	0,082		

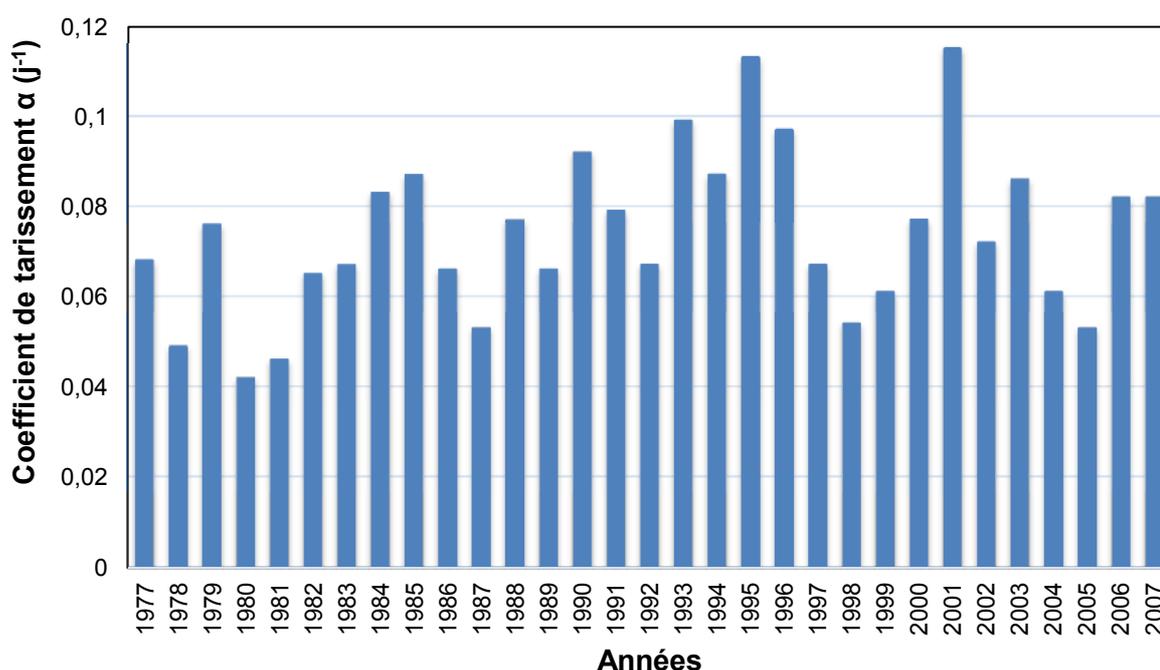


Figure 14 : Variabilité du coefficient de tarissement durant la période 1977-2007

La figure 14 illustre l'amplitude respective des coefficients de tarissement pour le bassin versant de l'Oued Mellah, Il est bien évident que le tarissement des nappes ne se produit pas de façon homogène pour tout le bassin versant.

Nous avons observé une rupture des coefficients de tarissement apparu en 1988. A cet effet, l'année 1988 a été choisie comme l'année de rupture durant la période d'étude. Ces résultats concordent avec de nombreux auteurs [28,67,74] qui ont également observé que 1987-1988 est l'année la plus marquée par la sécheresse hydrologique (faible hydraulicité) suivie par les années 1993-1994 et 2001-2002. Ainsi, durant l'année 1988-1989 les barrages de l'Ouest et du Centre se sont asséchés et moins ressentie à l'Est de l'Algérie, d'où la situation de l'approvisionnement en eau potable est devenue de plus en plus difficile à gérer.

Les résultats montrent que le coefficient moyen de tarissement était $6,49.10^{-2}j^{-1}$ avant 1988, identifiée comme l'année de rupture au sein des séries hydrométriques (tableau 8). Après 1988, le coefficient de tarissement devient $7,95.10^{-2}j^{-1}$. Ces résultats mettent donc en évidence une augmentation du coefficient de tarissement après 1988. Le taux d'augmentation du coefficient de tarissement est de 22,42 %.

Tableau 8 : Coefficients moyens de tarissement avant et après 1988

Station	Périodes	Tarissement moyen (j^{-1})	Taux d'augmentation (%)
Boucheougouf	1977-1988	$6,49.10^{-2}$	+22,42
	1989-2007	$7,95.10^{-2}$	

Les résultats de calcul de la durée de tarissement sont consignés dans le tableau 3. Ces résultats montrent que la durée de tarissement avant 1988 était 15,40 jours. Après 1988 la durée réduite à 12,58 jours. Un raccourcissement de la durée de tarissement allant de 3 jours après 1988 est mis en évidence.

Tableau 9 : Durées moyennes de tarissement (jours) avant et après 1988

Stations	Périodes	Durée de tarissement (jour)	Variation de la durée de tarissement (jour)
Boucheougouf	1977-1988	15,40	-2,82
	1989-2007	12,58	

III. Analyse des volumes d'eau mobilisés :

Les volumes d'eau mobilisés par l'aquifère et le volume de l'écoulement de base ont été déterminés selon la méthode proposée par [97].

Après sélection des données, de qualité acceptable, les récessions du débit de base de l'Oued Mellah du 28/01~04/02/1977 au 06/03~11/03/1977 (figure 15) et du 23/02~27/02/2007 au 08/03~15/03/2007 (figure 16) ont été analysées.

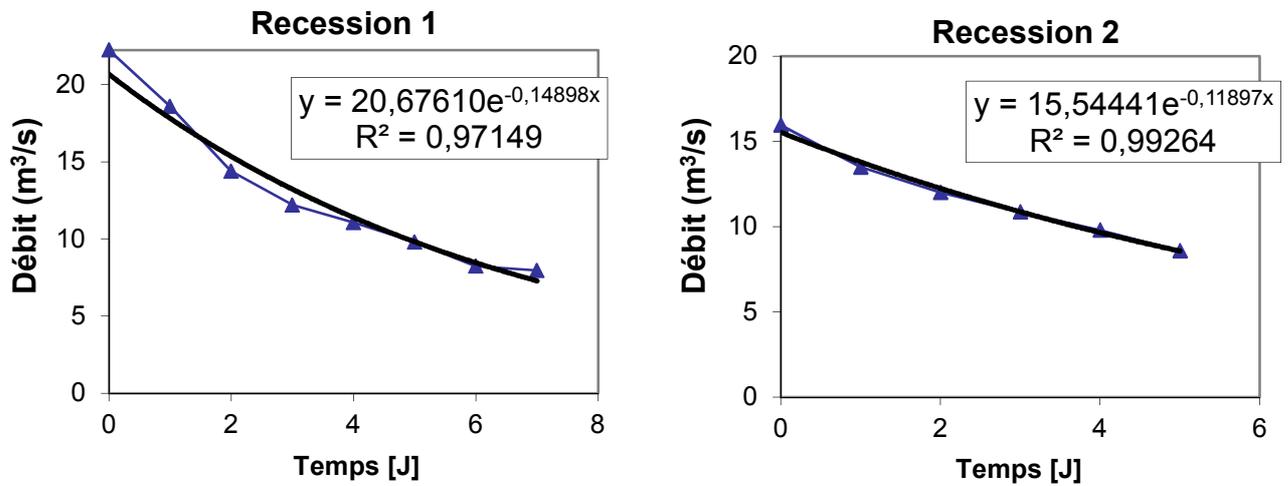


Figure 15 :Un exemple de deux récessions qui s’est produite en Janvier à Mars, 1977 à la station de Bouchagouf

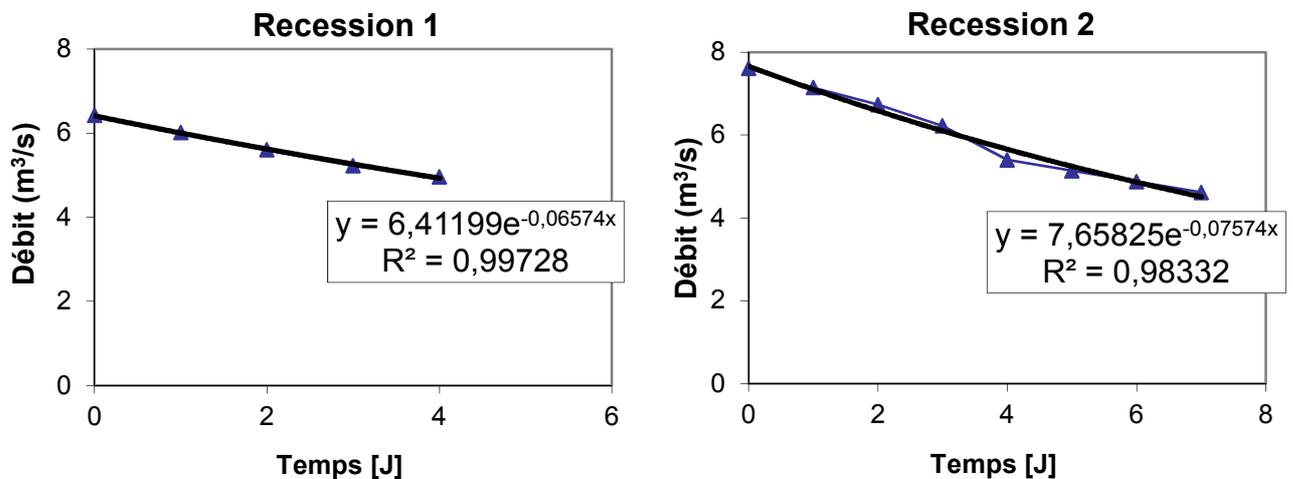


Figure16:Un exemple de deux récessions qui s’est produite en Février à Mars, 2007 à la station de Bouchagouf

Les figures 15et16 montrent un exemple de deux récessions pour deux évènements de crue enregistré à la station de Bouchagouf. Les résultats de cette analyse sont reportés dans les tableaux 10et 11 respectivement.

Tableau 10 : Résultats de calcul pour les premières récessions

Oued-station	Période de récession		Récession # 1			
			Q_0	Q_{tp}	t_1	Q_a
	Début	Fin	[m ³ /s]	[m ³]	[j]	[m ³]
Mellah-Bouchegouf	28/01/1977	04/02/1977	22.244	12504632	15	8245663
	23/02/2007	27/02/2007	6.425	8446540	35	1954511

Tableau 11 : Résultats de calcul pour les deuxièmes récessions

Oued-station	Période de récession		Récession 2			
			Q_0	Q_{tp}	t_1	R
	Début	Fin	[m ³ /s]	[m ³]	[j]	[m ³]
Mellah-Bouchegouf	06/03/1977	11/03/1977	15.970	11474895	19	7 215926
	08/03/2007	15/03/2007	7.605	8710999	30	2 218970

N.B.

L'estimation de la recharge des eaux souterraines et la décharge total des eaux souterraine a porté sur d'autres périodes sont reportées sur le tableau12 dans l'annexe.

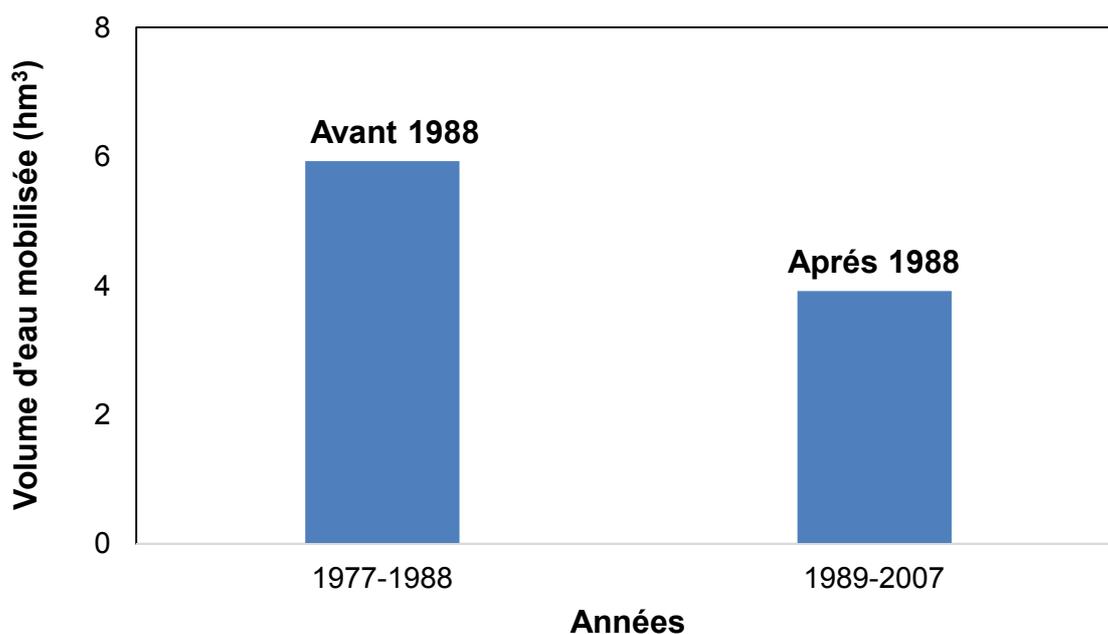
D'après les tableaux 10et11on observe une fluctuation du volume d'eau mobilisé dans l'aquifère (recharge) pour les deux années (1977 et 2007). La recharge d'eau souterraine qui se produite entre deux récessions estimé de 7.21 hm³ en 1977, et de 2.21 hm³ en 2007.En outre, le volume de débit de base qui est effectivement déchargée par la récession total, il est estimé de 8 245 663m³ en 1977, soit un débit de 95.43 m³/s, et de 1954 511m³ en 2007, soit un débit de 22.62 m³/s.

Le tableau 13 résume les résultats des volumes d'eau mobilisés avant et après l'année de rupture durant la période d'étude.

Tableau 13 : Volumes d'eau mobilisés par l'aquifère avant et après la rupture de 1988.

Station	Périodes	Volumes d'eau mobilisés (hm ³)	Taux de réduction (%)
Bouchegouf	1977-1988	5,93	-33,89
	1989-2007	3,92	

Le résultat du tableau 13 montre que le volume d'eau mobilisé par l'aquifère était 5.93 hm³ avant 1988. Après 1988, le volume d'eau mobilisé par l'aquifère réduit à 3,92 hm³, avec un taux de réduction de volume d'eau mobilisé de 33,89 %. Ces résultats mettent en évidence une diminution du volume d'eau mobilisé après 1988. Cette baisse a été également mise en évidence par la représentation graphique de volumes d'eau mobilisé par l'aquifère au pas de temps annuel (Figure 17).

**Figure 17** : Variations interannuelles de volume d'eau mobilisée (1977-2007) à la station de Bouchegouf

La méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude, montrent qu'une baisse marquée des volumes mobilisés par l'aquifère a été observée à partir de 1989 dans l'Oued Mellah (figure 18). Les résultats obtenus au cours de cette étude (1977-2007) concordent donc avec ceux obtenus par les auteurs précédents. Ces résultats montrent la faiblesse des quantités d'eau déversées dans les cours d'eau par les nappes souterraines.

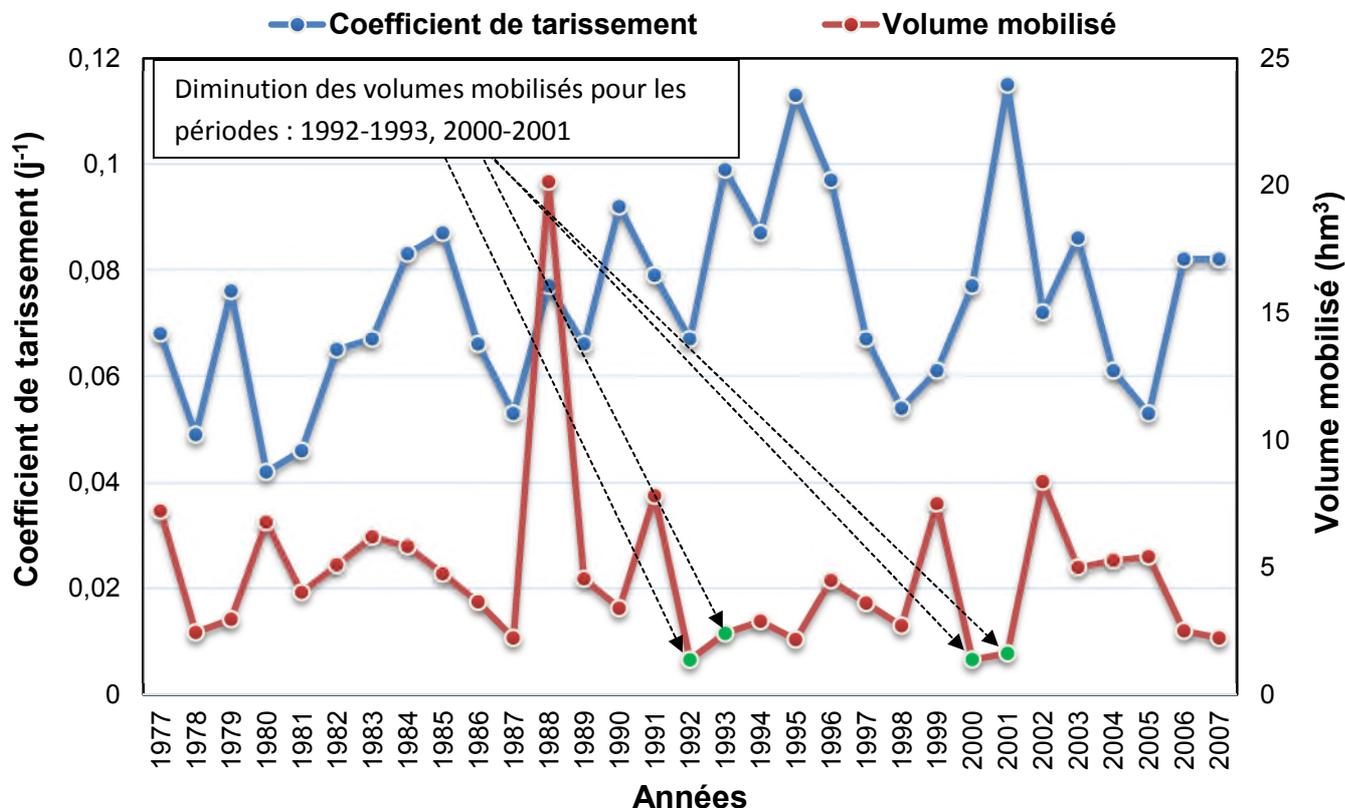


Figure 18 : Variation du coefficient de tarissement et du volume annuel mobilisé De l'Oued Mellah.

Il est évident que les volumes d'eaux mobilisée sont connu une baisse pour les années 1992-1993 et 200-2001 (figure 18). Cette dernière est principalement occasionnée par une baisse pluviométrique eau pour effet, la diminution des débits des cours d'eau du bassin.

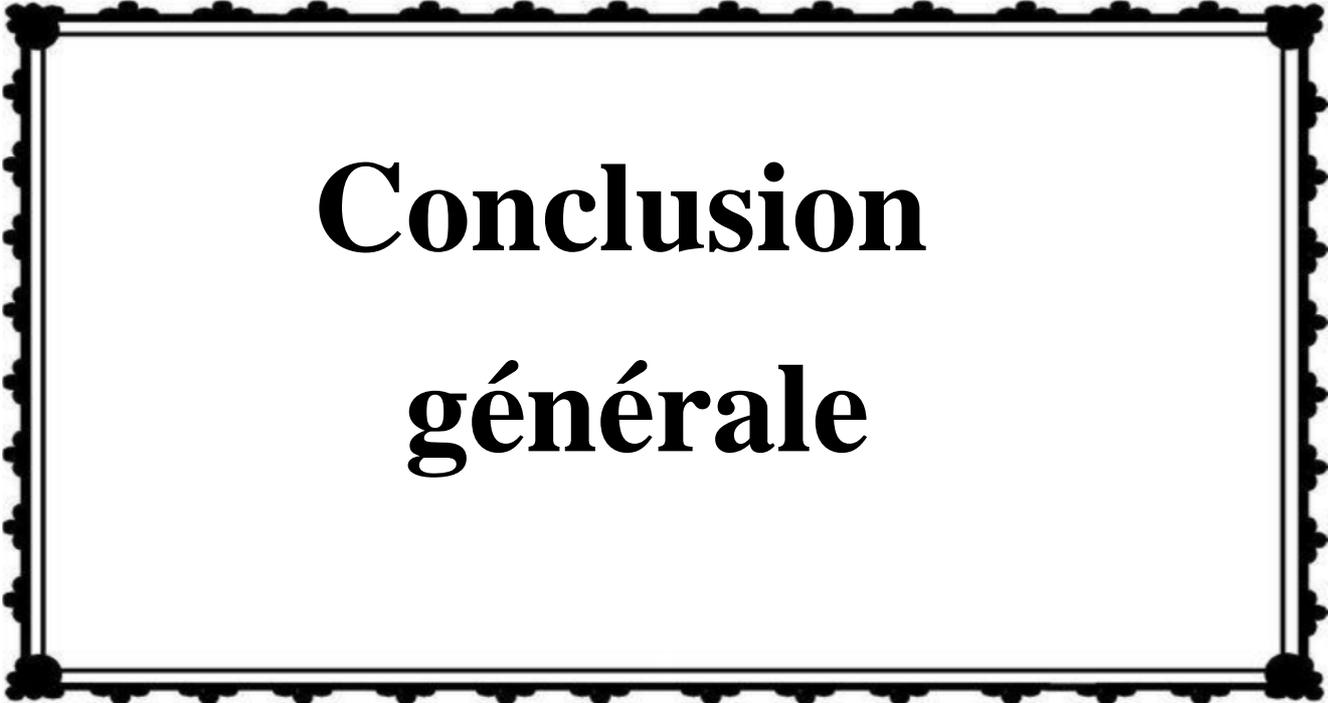
IV. Détermination de la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total :

On présente dans ce qui suit un bref aperçu sur la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total de l'oued Mellah avant et après 1988.

Tableau 14 : Contribution du débit de base au débit total de l'Oued Mellah

Station	Périodes	Volume de l'écoulement total (hm ³)	Volume de l'écoulement de base (hm ³)	Contribution au débit total (%)
Bouhegouf	1977-1988	1206.02	55.98	4.64
	1989-2007	1722.89	57.64	3.35

Le tableau 15 résume la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total avant et après l'année de rupture. Le débit de base de l'Oued Mellah avant 1988 est de 54 m³/s et le débit total correspondant 1163.21 m³/s. tandis que le débit de base après 1988 est de 35.11 m³/s correspond à un débit total de 1049.51 m³/s. Ces résultats suggèrent que la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total après 1988 a tendance à être plus faible que l'écoulement de base avant 1988.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le changement climatique désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement dans le sens d'un réchauffement global.

Ce phénomène peut entraîner des dommages importants : élévation du niveau des mers, accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresses, inondations, cyclones, ...), déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce, difficultés agricoles,....

Ce travail présente une modeste contribution à l'étude du changement climatique sur les ressources en eau souterraine et prend pour exemple particulier le bassin versant de l'Oued Mellah. La méthodologie s'est appuyée sur la loi de décroissance exponentielle de Maillet qui consiste à analyser la variation du coefficient de tarissement et le volume d'eau mobilisé par l'aquifère.

Nous avons utilisé une série de mesure de débits au pas de temps journaliers s'étalant sur une période de 1977-2007 enregistrée à la station de Bouchegouf à Oued Mellah.

La détermination du coefficient de tarissement a été réalisée par l'utilisation de régression exponentielle, et les volumes d'eau mobilisés par l'aquifère ont été évalués à l'aide d'une méthode analytique basée sur le principe de [98].

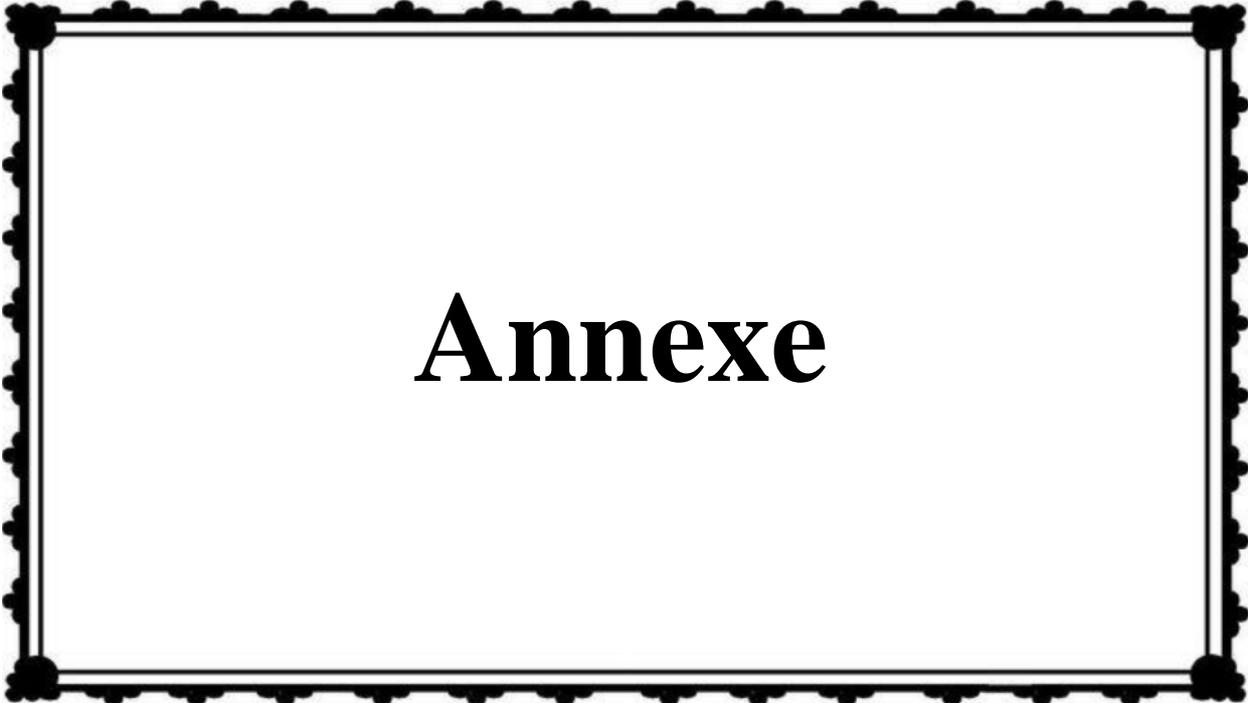
Dans notre analyse, de toutes les observations que nous avons faites, se dégagent trois résultats majeurs méritant d'être soulignés concernant l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques :

1. Tout d'abord Le coefficient moyen de tarissement était $6,49 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ avant 1988, identifiée comme l'année de rupture au sein des séries hydrométriques. Après 1988, le coefficient de tarissement devient $7,95 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$. Ces résultats mettent donc en évidence une augmentation du coefficient de tarissement après 1988. Le taux d'augmentation du coefficient de tarissement est de 22,42 %. Ces résultats mettent en évidence une augmentation du coefficient de tarissement après 1983, autrement dit une vidange beaucoup plus rapide des aquifères alimentant l'écoulement de base. Un raccourcissement de 3 jours de la durée de tarissement après 1988 a été mis en évidence.
2. Ensuite, il apparaît que les volumes d'eau mobilisés par l'aquifère étaient $5,93 \text{ hm}^3$ avant 1988. Après 1988, le volume d'eau mobilisé par l'aquifère a été réduit à

Conclusion générale

3,92 hm³, avec un taux de réduction de volume d'eau mobilisé de 33,89 %. Ces résultats mettent en évidence une diminution du volume d'eau mobilisé après 1988.

3. Enfin, Ces variations du volume d'eau mobilisé par l'aquifère suggèrent une régression considérable des ressources en eau souterraine sous l'influence des changements climatiques.



Annexe

Annexe

Tableau 12: Tableau récapitulatif de l'estimation de la recharge des eaux souterraines du bassin versant de l'Oued Mellah.

Période de tarissement		Récession 1				Période de tarissement		Récession 2			
		Q ₀ (m ³ /s)	t ₁ (j)	Q _{tp} (m ³)	Q _a (m ³)			Q ₀ (m ³ /s)	t ₁ (j)	Q _{tp} (m ³)	R (m ³)
Début	Fin					Début	Fin				
28/01/1977	04/02/1977	22,244	15	12504632	8245663	06/03/1977	11/03/1977	15,97	19	11474895	7215926
06/03/1978	14/03/1978	2,69	36	3599529	1453381	19/03/1978	31/03/1978	1,6	76	4577933	2431785
19/02/1979	06/03/1979	27,262	15	15137622	13674511	24/03/1979	30/03/1979	9,977	12	4398449	2935337
14/01/1980	26/01/1980	0,906	46	1581638	708892	19/02/1980	10/03/1980	3,7	55	7642327	6769580
01/04/1981	19/04/1981	2,916	51	5594875	3109888	24/04/1981	30/04/1981	5,096	34	6485516	4000529
11/03/1982	30/03/1982	3,49	56	7364373	3984561	11/04/1982	01/05/1982	4,307	52	8464753	5084941
07/03/1983	10/04/1983	5,366	94	19013816	10722384	20/04/1983	09/05/1983	15,955	24	14475228	6183797
16/02/1984	05/03/1984	0,538	90	1819857	671329	19/03/1984	07/04/1984	4,987	37	6959498	5810970
21/03/1985	30/03/1985	4,583	30	5165475	2576272	03/04/1985	17/04/1985	3,54	55	7327771	4738567
10/03/1986	20/03/1986	7,352	30	8174657	4419593	25/03/1986	31/03/1986	8,338	24	7371606	3616541
05/03/1987	15/03/1987	2,001	72	5444479	1482670	03/04/1987	27/04/1987	2,904	57	6168157	2206348
06/02/1988	08/02/1988	38,94	7	10261136	4939038	19/02/1988	22/02/1988	17,08	40	25468495	20146397
15/02/1989	22/02/1989	8,272	26	7958884	3716974	25/02/1989	05/03/1989	5,819	40	8776512	4534601
24/02/1990	06/03/1990	1,33	35	1752550	843495	28/03/1990	07/04/1990	3,493	33	4278789	3369735
04/03/1991	09/03/1991	17,362	25	16319193	8503284	15/03/1991	21/03/1991	13,5	31	15634569	7818661
13/01/1992	18/01/1992	0,826	28	874754	293283	20/02/1992	22/02/1992	0,734	71	1952759	1371287
28/02/1993	08/03/1993	3,776	20	2887049	1719208	24/03/1993	04/04/1993	4,661	20	3565575	2397734
04/02/1994	25/03/1994	2,57	113	10868361	7116446	01/04/1994	05/05/1994	1,02	173	6613164	2861248
24/02/1995	02/03/1995	6,613	34	8454408	2820816	04/03/1995	14/03/1995	6,425	32	7789335	2155743
14/03/1996	25/03/1996	4,815	33	6005226	3204885	29/03/1996	08/04/1996	3,827	51	7270974	4470632
16/03/1997	25/03/1997	4,08	43	6619124	2522798	01/04/1997	16/04/1997	4,613	44	7663941	3567615

Annexe

18/03/1998	03/04/1998	1,826	66	4510304	1934737	08/04/1998	20/04/1998	2,324	60	5260517	2604950
01/02/1999	01/03/1999	3,825	50	7230901	5222744	20/03/1999	16/04/1999	5,05	50	9514176	7506018
02/03/2000	09/03/2000	6,499	10	2432203	1949797	20/03/2000	02/04/2000	2,18	23	1855205	1372799
12/02/2001	15/03/2001	1,136	148	6333147	2418118	19/03/2001	21/04/2001	0,921	160	5537910	1622881
07/02/2002	22/02/2002	4,7	46	8049560	4275865	02/03/2002	14/03/2002	5,4	60	12149202	8375506
03/03/2003	17/03/2003	4,963	46	8505537	4309288	22/03/2003	26/03/2003	3,825	64	9179329	4983080
30/01/2004	03/02/2004	2,06	67	5151072	818131	07/02/2004	12/02/2004	1,67	153	9592706	5259764
03/03/2005	30/03/2005	2,64	62	6151494	3893638	03/04/2005	11/04/2005	1,526	134	7669650	5411739
25/03/2006	02/04/2006	0,195	180	1317579	123653	13/04/2006	21/04/2006	0,171	163	1042409	2483641
23/02/2007	27/02/2007	6,425	35	8446540	1954511	08/03/2007	15/03/2007	7,605	30	8710999	2218970

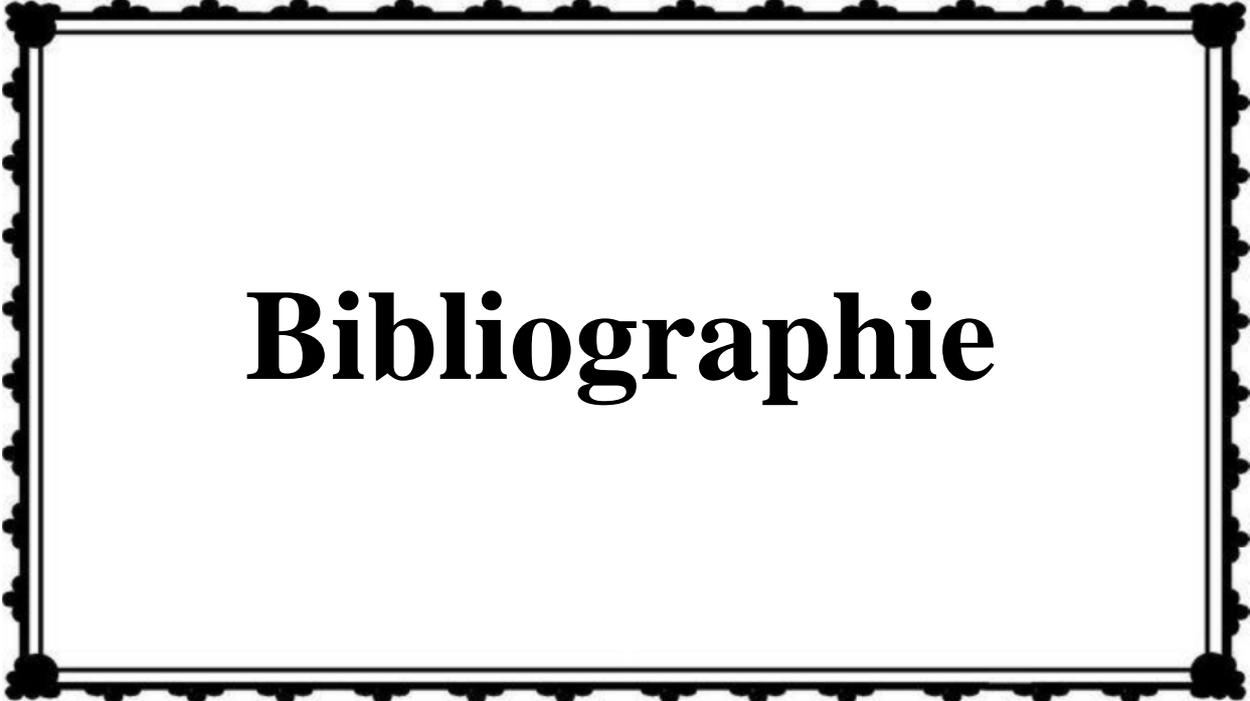
Avec

Q_0 : le débit à l'instant $t = 0$;

Q_{tp} : débit potentiel totale d'eau souterraine ;

Q_a : débit réel d'eau souterraine ;

R : la recharge entre deux récessions.



Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] **Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof**, 2008. Le changement climatique et l'eau. Document technique iv publié par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, secrétariat du GIEC. Genève, ISBN : 978-92-9169-223-1 236.
- [2] **Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, G.**, 2001. Annexe b : Glossaire. In changements climatiques 2001 : Rapport de synthèse. Royaume-Uni et New York, NY, États- Unis : Cambridge UniversityPress, Cambridge [3]
- [3] **Vermoux.J.F,Seguin .J.J.**(2011)- Etablissement d'un réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines – année 1 ,rapport BRGM/RP -59286-FR,129 page ,69
- [4] **Treidel .H, Martin-Bordes.J.L, Gurdak.J.J**,2011,Climat change effects on groundwater resources : a global synthesis of findings and recommendations
- [5] **Julie, F**, « Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse », Bilan des connaissances, Septembre 2012, p39-40.
- [6] **Duplessy J.C.**, 2001 : État des connaissances et incertitudes sur le changement climatique induit par les activités humaines. Compte Rendu de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des planètes, vol. 333, p. 765-773.
- [7] **Leroux M.**, 2007 : Les échanges méridiens commandent les changements climatiques. Séminaire de travail "Évolution du climat", Académie des sciences, Paris, 12 p.
- [8] **Christensen JH., Hewitson B., Busuijac A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kollir.K., Kwon W.T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mears L., Menéndez C.G., J. Räisänen J., Rinke A., Sarr A. et Whetton P.**, 2007: Chapter 11: Regionalclimate projections. In : Climate change 2007: the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, TignorM et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge UniversityPress, Cambridge/New York, p. 847-940.
- [9] **OMM** (2013), 2001-2010 : une décennie d'extrême climatique. OrganisationMétéorologique Mondiale, communiqué de presse n° 976.
- [10] **Trenberth K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein T A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. et Zhai P.**, 2007 : Chapter3:Regionalclimate projections. In : Climate change 2007 : the physical sciences basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, S.

Références bibliographiques

- Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, TignorM et H.L. Miller édit., Édit. Cambridge University Press, Cambridge/New York, p. 235-336.
- [11] **Le Monde**, 2011 : Inondations : l'Australie s'attend à une facture record. URL : http://www.lemonde.fr/asi-pacifique/article_inondations-l-australie-s-attend-a-une-facture-record_1466392_3216.html. (Date de consultation 17/01/2011)
- [12] **Bossy D.**, 2013 : La mousson en Inde est-elle exceptionnelle en 2013. Futura Sciences, URL <http://www.futurasciences.com/magazines/environnement/infos/actu/d/meteorologiemousson-inde-elle-exceptionnelle-2013-47361/>
- [13] **Norant C.**, 2004 : Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Étude diagnostique. Thèse de l'Université de Provence (Aix Marseille I), 266 p.
- [14] **Douguédroit A. et Bridier S.**, 2007 : Réchauffement climatique et évolution de l'environnement des stations en région méditerranéenne française (1951-2000). In : Climat, tourisme, environnement, Actes du XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie), H. BEN BOUBAKER édit., p. 204-209.
- [15] **Rothschild E. et Beltrando G.**, 2007 : Évolution des températures observées en Suisse durant les dernières décennies. In : Risques et changements climatiques, Actes du XXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Carthage, Tunisie), H. Ben Boubaker édit., p. 489-494.
- [16] **Lamarre D.**, 2008 : Climats et risque : changements d'approches. Édit. LAVOISIER, Paris, 170 p.
- [17] **Sebbar A., Hsaine M., Foughrach H. et Badri W.**, 2012 : Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. In : Les climats régionaux : observation et modélisation, Actes du XXVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Grenoble), S. Bigot et S. Rome édit., p. 709-714.
- [18] **Amraoui L., AdamaSarr M. et Soto D.**, 2011 : Analyse rétrospective de l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, vol. V, p. 125-142. URL : <http://physio-geo.revues.org>.
- [19] **Sebbar A., Badri W., Foughrach H., Hsain M. et Saloui A.**, 2011 : Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Sécheresse*, vol. 22, n° 3, p. 139-148.
- [20] **Nouaceur Z.**, 2010 : Évaluation des changements climatiques au Maghreb. Étude du cas des régions du quart nord-est algérien. In : Risques et changements climatiques, Actes du XXIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Rennes), p. 463-468.
- [21] **Amyay M., Nouaceur Z., Tribak A., Obdak.H. et Taous A.**, 2012 : Caractérisation des évènements pluviométriques extrêmes dans le moyen Atlas marocain et ses marges. In : Actes du XXVème colloque international de climatologie (Grenoble), p. 75-80.

Références bibliographiques

- [22] **Khaldi A.**, 2005 : Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida". Thèse présentée pour obtenir le titre de Docteur d'Etat à la faculté des Sciences de la terre, de Géographie et l'Aménagement du Territoire, Université d'Oran, Mai 2005.
- [23] **Djellouli Y., &Daget P.**, 1993 : Conséquences de la sécheresse des deux dernières décennies sur les écosystèmes naturels algériens, Publication Association International Climatologique, 6, pp105-14.
- [24] **Laborde J.P.**, 1993 : Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord à l'échelle de 1/500000. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, projet PNUD/ALG/88/021, une carte avec notice explicative, 44 p.
- [25] **Meddi H. &Meddi M.**, 2007 : Variabilité spatiale et temporelle des précipitations du Nord-Ouest de l'Algérie. *Geographia Technica*, n° 2, 49-55.
- [26] **Hirche A., Boughani A. &Salamani M.**, 2007 : Évolution de la pluviosité dans quelques stations arides algériennes. *Sécheresse*, Vol. 18 (4), 314-320.
- [27] **Meddi M. et Hubert P.**, 2003 : Impact de la modification du régime pluviométrique sur les ressources en eau du Nord-Ouest de l'Algérie. *Hydrology of the Mediterranean and semiarid Regions*. IAHS publication N° 278.
- [28] **Mebarki A.**, 2010: Surface flows and hydrologic balance mapping: The case of the Eastern Algerian basins. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, Vol 21, I 4. P. 3-10.
- [29] **GIEC**, 2008 : Changements climatiques et impacts dans les Alpes. Résultats du WP5 du projet Clim Ch Alp. Rapport Technique N°1 de l'ONERC, France.
- [30] **Sircoulon**, 1. (1976). Les doublées hydro pluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses " 1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, Serie Hydrot*. XIII(2).
- [31] **CANTAT O.** (1995) - Variabilité et variation climatiques en Normandie. L'évolution récente des températures à Caen-Carpiquet. *Sécheresse*, vol. 6, n° 3, p. 273-279.
- [32] **WMO**, 1966: Climatic change. Report of a working group of the commission for climatology - Technical Note N° 79. Secretariat of World Meteorological Organization -Geneva - Switzerland, 79p.
- [33] **Lubes H., Masson J-M., Servat E. et Paturel J-E., et Boyer J-F** 1994 : Caractérisation de fluctuations dans une série chronologique par application de tests statistiques. Etude bibliographique, rapport 3, Programme ICCARE. ORSTOM, Montpellier, France.
- [34] **Cavadias Georges**, 1994 : Detection and Modelling of the impact of climatic change on river flows. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands, pp 207-218.
- [35] **Ouarda Taha B.M.J., Rasmussen P.F., Cantin J.F., Bobée B., Laurence R., Hoang V.D. et Barabé G.**, 1999 : Identification d'un réseau hydrométrique

Références bibliographiques

- pour le suivi des modifications climatiques dans la province du Québec. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 425-448.
- [36] **Hubert P., Servat E., Paturol J., Kouame B., Bendjoudi H., Carbonnel J.P et Lubes-Niel H.**, 1998 : La procédure de segmentation, dix ans après. Proceedings of the Abidjan'98 conference on the Water Resources variability in Africa during the XXth Century. IAHS Publication 252, pp267-273.
- [37] **Paturol J.E., Servat E., Kouamé B., Boyer J.F., Lubes H., et Masson J.M.**, 1995 : Manifestations de la sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne. Cas de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin. *Sécheresse*, 6(1), pp 95-102.
- [38] **Paturol J.E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Ouedraogo M. et Masson J.M.**, 1997: Climatic variability in humid Africa along the gulf of Guinea. Part II : an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, 191, pp 16-36.
- [39] **Tarhule Aondover, Woo Ming-ko**, 1998 : Changes in Rainfall characteristics in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, 18(11), pp 1261-1271.
- [40] **Moron Vincent**, 1994: Guinean and Sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). *International Journal of Climatology*, 14(3), pp 325-341.
- [41] **Servat E., Paturol J.E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., et Marieu B.**, 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), pp 363-387.
- [42] **Servat E., Paturol J.E., Lubès H., Kouamé B., Ouedraogo M. et Masson J.M.**, 1997 : Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I : detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, 191, pp 1-15.
- [43] **Houndénou C. & Hernandez K.**, 1998 : Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique occidentale). *Sécheresse*, 9(1), pp 23-34.
- [44] **Sircoulon J.**, 1987 : Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'ouest depuis le début du 20ème siècle. Proceedings of the Vancouver Symposium on the Influence of Climatic Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources. IAHS Publ. n° 168, pp 13-25.
- [45] **Opoku-Ankomah y. & Amisigo B.A.**, 1998: Rainfall and runoff variability in the southwestern river system of Ghana. Proceedings of the Abidjan'98 conference on the Water Resources variability in Africa during the XXth Century. IAHS Publ. n° 252, pp 307-321.
- [46] **Bello N.J.**, 1998: Evidence of climate change based on rainfall records in Nigeria. *Weather*, 52(12), pp 412-418.
- [47] **Assani A.**, 1999: Analyse de la variabilité temporelle des précipitations (1916-1996) à Lubumbashi (Congo-Kinshasa) en relation avec certains indicateurs de la circulation atmosphérique (oscillation australe) et océanique (El Niño/La Niña). *Sécheresse*, 10(4), pp 245-252.

Références bibliographiques

- [48] **Kadi D.**, 1995 : Contribution à l'étude de la sécheresse sur le littoral algérien par le biais de traitement des données pluviométriques et la simulation, Thèse de Magister, Ecole nationale polytechnique d'Alger.
- [49] **Obassi G.O.** (1994). WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75-9.
- [50] **Watson, R.T., Zinyowera, M.C. et Moss, R.H.**, 1997: The Regional Impacts of Climate Change : An Assessment of Vulnerability. - Intergovernmental panel in Climate Change (IPCC), Working Group II, Special Report, November 1997. Consulté en ligne : <http://www.grida.no/climate/ipcc/>.
- [51] **The Nation**, 25 Mai 2000: <http://www.africanews.org/east/kenya/stories>.
- [52] **L'Hôte Y., Mahé G., Somé B. et Triboulet J.P.**, 2002 : Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000 ; the drought continues. *Journal des sciences Hydrologiques*, 47(4), 563-572.
- [53] **Paturel J.E., Boubacar I. et L'Aour A.**, 2004 : Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et centrale au XXème siècle. *Sud Sciences and Technologies*. N°13, pp 40 – 46.
- [54] **Ardoin-Bardin S.**, 2004 : Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone Soudano-sahélienne. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 440p.
- [55] **Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J., Wotling G.**, 2001 : "Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa," *J. Sci. Hydrol.*, vol. 46, n° 2, pp.211–226.
- [56] **Olivry, J. C.** (1997) Long term effects of rain shortage: the ill rivers of Western and Central Africa. *FRIEND General Report UNESCO IHP V. UNESCO*, IS8-162. Paris, France.
- [57] **Kouame KF.**, 2011 : "Influences de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne humide et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des Systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL," Thèse de l'Etat sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan. 379 p.
- [58] **Nicholson. E.** (1994). Recent rainfall fluctuations in Africa and their relationship to past conditions over the continent, *The Holocene*, Vol.4, N°2, 121-131.
- [59] **Vissin E- W.**, 2007 : "Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger," Thèse de Doctorat. Hydroclimatologie. Université de Bourgogne Centre de Recherches de Climatologie - CNRS -UMR 5210. tel-00456097, version 1 - 11 Feb 2010. 285 p.
- [60] **Kingumbi A.**, 2006 : Modélisation hydrologique d'un bassin affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie Centrale. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 300 p.

Références bibliographiques

- [61] **Bergaoui. M** et al., 2001: Caractérisation de la sécheresse météorologique: cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. Rev. Sécheresse. Vol. 12 n°4. p. 205-213.
- [62] **Benzarti Z., Hbaieb H.** (2001): Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996), Sécheresse, 4(12): 215-220.
- [63] **Bergaoui Z.**, 1983 : Contribution à l'étude statistique de la pluie dans la région de Tunis. Thèse présentée à l'institut nationale polytechnique de Toulouse. 134 pp.
- [64] **Kingumbi A.** (2006). Modelisation hydrologique d'un bassin versant affecté par des changements d'occupation. Cas du Merguellil en Tunisie centrale. These de l'Ecole Nationale d'Ingenieurs de Tunis, Tunisie, 199p.
- [65] **Lahache RG.**, et Pillet G., 2008 : Projection des ressources en eau de la Tunisie sous les effets des changements climatiques globaux. XIIIth World Water Congress (Montpellier,2008), 12 p.
- [66] **Matari A., Kerrouche M., Bousid H., Douguedroit A.**, 1999 : Sécheresse dans l'ouest algérien. Publications de l'association internationale de climatologie, volume 12, 1999.
- [67] **Khettab A.**, 2001. Les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision. Desalinisation 136 (2001) 25–33.
- [68] **Khoualdia W., Mrad D., Djebbar Y., et Abida H.**, 2008 : Cycle, Tendance ou Changement Climatique Analyse Statistique de la Pluviométrie de la Région de Souk-Ahras, Algérie. 4ème conférence internationale sur Les Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen, Alger, Algérie, 22-23 Mars 2008
- [69] **Khoualdia W., et Djebbar Y.**, 2010: « sécheresse et gestion des ressources en eau dans le bassin versant Nord de la Medjerda, Algérie ». Colloque international CIEAU, 25-27 octobre 2010 Annaba.
- [70] **Khoualdia W., et Djebbar Y.**, 2011 : « Changement de la variabilité de pluie et concepts de modèles probabilistes pour la gestion des ressources hydriques du bassin versant d'oued Medjerda : Est Algérien ». Colloque international sur les ressources en eau et le développement durable CIREDD'4 : ENSH/22 et 23 février 2011 Alger.
- [71] **Khoualdia W., et Djebbar Y.**, 2012 : « Contribution à l'étude de la sécheresse et son impact sur les ressources en eau de surface du bassin versant nord de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie) ». Colloque international « Géomatique et gestion des risques naturels » : 6-8 Mars 2012 université Oujda (Maroc).
- [72] **Khoualdia W., et Djebbar Y.**, 2013: Caractérisation de la variabilité climatique dans le bassin versant de la Medjerda (Nord Est de l'Algérie). Colloque international « Hazards and Géomatics » : 17-20 Mai 2013 Hammamet - Tunisie.
- [73] **Khoualdia W., Djebbar Y., et Hammar Y.**, 2014: Caractérisation de la variabilité climatique « cas du bassin versant de Medjerda » Nord- Est de l'Algérie. Rev. Sci. Technol., Synthèse 29: 6-23 (2014) (REVUE. SYNTHÈSE ANNAB

Références bibliographiques

- [74] **Kettab A., Ait Mouhoub D., Ouarda T., Bobbee B.**, 2002 : Contribution a l'étude du phénomène de la sécheresse sur les régions littorales de l'Algérie » Laboratoire de recherche en Sciences de l'eau – LRS – EAU/ENP Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P) – Alger; Colloque international sur l'eau, Chelef, 05/06/février, Algérie.
- [75] **Meddi H. & Meddi M.**, 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest del'Algérie. Sécheresse, Vol 20, 57-67.
- [76] **Beersma, J. J., and T. A. Buishand** (2004), Joint probability of precipitation and discharge deficits in the Netherlands, *Water Resour. Res.*, 40, W12508, doi: 10.1029/2004WR003265.
- [77] **Lloyd-Hughes.B, Saunders.M**, (2002) International Journal of Climatology,"Adroght Climatology for Europe "*Int. J. Climatol.* 22: 1571–1592
- [78] **OMM-WMO.**, 2000. Detecting trend and other changes in hydrological data. In :Kundzewicz ZW, Robson A, eds. World Climate Programme Data and Monitoring. WCDMP-45. WMO/TD-n° 1013. Genève.
- [79] **Svoboda M., Hayes M., Heim R., Gleason K., Angel J., Rippey B., Tinker R., PaleckiM., Stooksbury D., Miskus D., et Stephens S.**, 2002 : The drought monitor, *Bull. Amer.Meteor. Soc.*, 83, 1181–1190
- [80] **Robles M., López N., Gadsden H., Pineda R., Reyes-Gómez M. et Hinojosa R.**, 2006 : Analyse des déficits hydriques dans l'état de Chihuahua (Mexique). *Sècheresse*, 17(4), 457-465.
- [81] **Jarraud M.**, 2006 : changements climatiques et gestion des risques, conférence de pressel'Organisation météorologique mondiale (OMM), La Pastorale » Route de Ferney 106, Genève.
- [82] **Chouabbi.A.** 1987, Etude géologique de la région de Hammam N'Bails (SE de Guelma, Constantine, Algérie), Thèse de doctorat de troisième cycle, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 123p..
- [83] **haoui W. (2007)** : Impact de la pollution organique et chimique des eaux de l'oued Mellah sur les eaux souterraines de la nappe alluviale de Bouchegouf (Guelma). Mémoire de Magister en Hydrogéologie, IST, Univ. Annaba. 104p.
- [84] **Mebarki A. (2005)** : Hydrologie des bassins de l'Est Algérien : Ressources en eau, Aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état (Géographie et Aménagement du Territoire, option : **Hydrologie**), Univ. Constantine. 360p.
- [85] **Ghachi A.**, 1986, Hydrologie et utilisation de la ressource en eau en Algérie: le bassin de la Seybouse, Alger, O.P.U., 508 p.
- [86] **LOUAMRI, A**, 2013, le bassin-versant de la sybousse (Algérie orientale): hydrologie et aménagement des eaux Thèse universitaire de Costantine 1.,300pp
- [87] **Dacharry, M.**, 1997. Dictionnaire français d'hydrologie.Darcy, 1856.
- [88] **Roche, M., 1963.** Hydrologie de surface. Paris : Gauthier Villars éditeur. 430 p.

Références bibliographiques

- [89] **Boussinesq, J.**, 1877 : Essai sur la théorie des eaux courantes. Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences de l'Institut National de France, Tome XXIII, No. 1.
- [90] **Maillet, E.**, 1905. Essai d'hydraulique souterraine et fluviale, Librairie scientifique A. Herman, Paris.
- [91] **Tallaksen, L.M.**, 1995. A review of baseflow recession analysis, Journal of Hydrology, Vol. 165, No. 1–4, pp.349–370.
- [92] **Dewandel B., Lachassagne P., Bakalowicz M., Weng Ph. et AL-Malki A.**, 2002. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs, Application to the Oman ophiolitehardrock aquifer, Journal of hydrology, 274, 248-269.
- [93] **Lerner, D.N., Issar, A.S., and Simmers, I.**, 1990. Groundwater recharge. Intl Assoc. Hydrogeologists, 345 p.
- [94] **Lerner, D.N.**, 1997. Groundwater recharge. In: O.M. Saether and P. de Caritat (Editors), Geochemical Processes, Weathering and Groundwater Recharge in Catchments. A.A. Balkema, Rotterdam, p. 109-150.
- [95] **Scanlon BR, Healy RW, Cook PG.** 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal 10: 18–39.
- [96] **Charles, E. G., Behroozi, C., Schooley, J., and Hoffman, J. L.**, 1993, A method for evaluating ground-water recharge areas in New Jersey: New Jersey Geological Survey Report GSR-32, 95 p.
- [97] **Meyboom, P.** (1961) 'Estimating groundwater recharge from stream hydrographs', Journal of Geophysical Research, Vol. 66, No. 4, pp.1203–1214.
- [98] **Sun, H. 2004.** Estimating the fate of precipitation from stream discharge: A case study in New Jersey. Bulletin of the New Jersey Academy of Science 49, no. 2: 9–15.
- [99] **Khanchoul, K 2006** ; Quantification de l'érosion et des transports solides dans certains bassins versants du nord –est Algérien Thèse en vue de L'obtention du diplôme de Doctorat D'état en Géologie Option Hydrogéologie Université Badji Mokhtar de Annaba .296p
- [100] **Boulkroud, Z 2009** ; Variations quantitatives et qualitatives des ressources en eau des nappes superficielles de Annaba mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister, option hydrogéologie Université Badji Mokhtar de Annaba .139p

Références bibliographiques
