



**Centre d'Etudes Doctorales : Langues, Patrimoine et Aménagement du Territoire  
(LAPATER)**

**Option : Aménagement du Territoire**

**Laboratoire D'Analyses Géo-Environnementales et d'Aménagement – Développement  
Durable (LAGEA-DD)**

**Thèse de Doctorat en Géographie Physique**

**intitulée :**

**Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements  
actuels: Perturbation des régimes climatiques et  
pression anthropique**

Préparée par le doctorant:

**RACHID ADDOU**

*Le : 02 juillet 2021*

*Membres de Jury :*

Pr. Mhamed AMYAY	FLSH, Saïs - Fès	Président
Pr. Jamal AL KARKOURI	FSHS, Kénitra	Membre
Pr. Mohamed HANCHANE	FLSH, DM - Fès	Membre
Pr. Khalid OBDA	FLSH, Saïs - Fès	Encadrant

**Année universitaire : 2020-2021**

## **SOMMAIRE**

### **INTRODUCTION GENERALE**

#### **CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS**

Introduction du chapitre.....	14
1 Délimitation du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	14
2 Indices de forme.....	14
3 Analyse du relief.....	23
4 Indices de reliefs.....	27
5 Réseau hydrographique.....	30
6 Profils en long.....	36
7 Estimation des indices hydromorphométriques pour les 11 sous bassins.....	39
8 Contexte structural et lithologique du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	43
9 Couverture végétale du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	46
Conclusion du chapitre.....	48

#### **CHAPITRE II : CONTEXTE CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SON IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE**

Introduction du chapitre.....	51
1 Données climatiques utilisées.....	51
2 Méthodes de synthèse climatique et d'analyse des données.....	56
3 Contexte climatique aride du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	67
4 Variabilité spatiale des précipitations et estimation de la lame d'eau précipitée.....	69
5 Variabilité temporelle des précipitations.....	76
6 Variabilité thermique du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	106
7 Estimation de l'évapotranspiration.....	124
Conclusion du chapitre.....	130

#### **CHAPITRE III : VARIABILITE HYDROLOGIQUE DE L'OUED MELLOULOU ET PHASES HYDROLOGIQUES EXTREMES**

Introduction du chapitre.....	133
1 Données hydrométriques.....	133
2 Analyse des modules annuels des débits.....	136
3 Régimes hydrologiques des débits.....	149
4 Phases hydrologiques.....	161
5 Variabilité spatiale des écoulements dans le bassin versant.....	190
6 Lac de Tameda : un barrage naturel alimentant le réservoir hydrogéologique.....	205
Conclusion du chapitre.....	209

#### **CHAPITRE IV : EVOLUTION D'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SON IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE**

Introduction du chapitre.....	212
1 Exploitation des eaux dans le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	212
2 Périmètre irrigué de Taddart ; une zone agricole basée sur les apports de l'Oued.....	223
3 Périmètre irrigué de Guercif, une zone agricole par excellence.....	226
4 Superficie des terres irriguées par les eaux souterraines.....	229
5 Gestion de l'eau agricole.....	232
6 Facteurs expliquant l'extension des terres agricoles.....	235
7 Dynamique des terrasses agricoles sur les terrasses fluviales.....	239
Conclusion du chapitre.....	240

### **CONCLUSION GENERALE**

# Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

## RESUME:

Ce travail de thèse de Doctorat traite la problématique des ressources en eau en un milieu aride du Maroc Oriental, fortement menacé par le stress hydrique et où les sociétés rurales sont extrêmement vulnérables aux conditions du milieu et fortement pauvres. Son objectif est de contribuer, plus spécifiquement, à la compréhension de l'hydrologie de l'Oued Melloulou tout en mettant l'accent sur les facteurs physiographiques, les aspects de la variabilité climatique actuelle et les effets anthropiques qui sont exprimés par les activités agricoles.

Le bassin versant de l'Oued Melloulou est un affluent de la rive gauche de la Moulouya. Il chevauche sur deux unités topographiques: le Moyen Atlas plissé au Sud et Sud-Ouest et la plaine de Guercif au Nord et Nord-Est. L'Oued Melloulou a une place primordiale dans l'alimentation en eau d'irrigation et en eau potable des zones qu'il traverse, et il contribue de 40% de l'écoulement de la Moulouya. L'agriculture en irrigué est l'activité économique principale exercée par la population locale.

Pour répondre aux objectifs fixés par cette étude, une approche géographique a été élaborée. En effet, l'étude détaillée des caractéristiques physiques du bassin versant a été réalisée. Ensuite, l'analyse de la variabilité spatiotemporelle (1970-2015) des éléments climatiques a été élucidée. La variabilité spatiotemporelle des écoulements (1990-2015) est établie en se basant sur les données des stations hydrométriques et sur plusieurs campagnes de jaugeages. Pour mettre en relief l'effet anthropique sur les ressources en eau de l'Oued Melloulou dans un contexte climatique changeant, les questions de perception de la population à la variabilité hydroclimatique actuelle et les méthodes de gestion de l'eau déployées ont été soulevées en se basant sur les enquêtes de terrain et sur la cartographie de l'évolution d'occupation des sols entre 2000 et 2020.

Les caractéristiques physiques du bassin versant indiquent que ce dernier a une forme globalement allongée et une perméabilité assez importante. Les résultats d'analyse des totaux pluviométriques annuels montrent une tendance vers l'augmentation. Cette augmentation est expliquée par la tendance statistiquement significative vers l'accroissement des précipitations automnales. En revanche, les précipitations printanières ont connu une tendance vers la diminution sans qu'elles soient statistiquement significatives. Ainsi, la répartition saisonnière a connu un changement d'un régime printanier à un régime automnale au cours de ces deux dernières décennies du 21<sup>ème</sup> siècle qui peut être le signal d'une intensification de l'aridité. En plus, les températures moyennes annuelles présentent une tendance significative vers l'augmentation, notamment celles des températures moyennes maximales, ce qui peut engendrer une forte demande climatique en vapeur d'eau et intensifier encore plus le processus d'aridification. Les pluies extrêmes automnales, ayant accompagné l'évolution des régimes pluviométriques actuels, ont eu un effet sur l'augmentation significative des débits des crues. Ceci a engendré des pertes importantes des terres agricoles au niveau des basses terrasses fluviales.

Par ailleurs, les débits jaugés présentent une diminution de leurs valeurs de l'amont vers l'aval. Ces écoulements sont influencés par la forte perméabilité du terrain et par l'évolution accélérée des terres agricoles qui sont irriguées par les apports de l'oued. Par conséquent, l'écoulement du cours d'eau principal présente un déficit qui ne satisfait pas les besoins en eau agricole pendant la période des étages.

Face aux changements dans les régimes hydroclimatiques, les agriculteurs, notamment ceux occupant la partie aval de l'Oued Melloulou, sont conscients des conséquences actuelles et futures du risque de la pénurie en eau et des crues sur leur stabilité économique et sociale. De ce fait, des formes d'adaptation à ces changements ont été observées. Il s'agit d'un recours aux eaux souterraines pour combler les besoins en eau d'irrigation et d'une création de nouvelles terres sur les hautes terrasses ou sur le plateau, loin des effets probables des crues.

La présente étude ouvre certaines perspectives de recherche. En premier lieu, il s'agit des conséquences probables du climat futur et des subventions étatiques pour la création des terres agricoles au dépend des nappes phréatiques locales. En second lieu, les effets probables du barrage de TargaOumadi, en phase de construction, sur l'hydrologie de l'Oued Melloulou doivent être abordés, notamment ceux sur les ressources en eau dans la région orientale et sur le paysage agricole futur. Enfin, il semble nécessaire de développer des recherches approfondies, d'une part, sur les pertes en eau par évapotranspiration dans cette région où la demande climatique est de plus en plus élevée, et d'autre part, sur la contribution des chutes de neige dans l'écoulement de l'Oued Melloulou.

---

**Hydrology of Oued Melloulou and current changes: Disruption of climatic regimes and anthropogenic pressure.**

**ABSTRACT:**

This doctoral thesis deals with the problem of water resources in an arid environment in eastern Morocco, strongly threatened by water stress and where rural societies are extremely vulnerable to environmental conditions and severely poor. Its objective is to contribute, more specifically, to the understanding of the hydrology of Oued Melloulou while emphasizing physiographic factors, aspects of current climate variability and anthropogenic effects which are expressed by agricultural activities.

The Oued Melloulou watershed is a tributary of the left bank of the Moulouya. It straddles two topographic units: the Middle Atlas folded in the South and South-West and the plain of Guercif in the North and North-East. The Oued Melloulou plays an essential role in supplying irrigation water and drinking water to the areas it crosses, and it contributes 40% of the flow of the Moulouya. Irrigated agriculture is the main economic activity carried out by the local population.

To meet the objectives set by this study, a geographic approach was developed. Indeed, a detailed study of the physical characteristics of the watershed has been carried out. Then, the analysis of the spatiotemporal variability (1970-2015) of climatic elements was elucidated. The spatiotemporal variability of flows (1990-2015) is established based on data from hydrometric stations and on several measurement campaigns. To highlight the anthropogenic effect on the water resources of the Oued Melloulou in a changing climatic context, the questions of the population's perception of the current hydroclimatic variability and the water management methods deployed were raised in based on field surveys and on the mapping of changes in land use between 2000 and 2020.

The physical characteristics of the watershed indicate that it has a generally elongated shape and a fairly high permeability. The results of the annual rainfall totals show an increasing trend. This increase is explained by the statistically significant trend towards increased fall precipitation. In contrast, spring precipitation has trended downwards without being statistically significant. Thus, the seasonal distribution has undergone a shift from a spring regime to a fall regime during the last two decades of the 21st century which may be a signal of intensification of aridity. In addition, annual average temperatures show a significant tendency towards increasing, especially those of maximum average temperatures, which can generate a high climatic demand for water vapor and further intensify the aridification process. The extreme autumn rains, having accompanied the evolution of current rainfall regimes, had an effect on the significant increase in flood flows. This has led to significant losses of agricultural land at the level of the low river terraces.

In addition, the gauged flows show a decrease in their values from upstream to downstream. These flows are influenced by the high permeability of the land and by the accelerated development of agricultural land which is irrigated by the inflow of the wadi. Consequently, the flow of the main stream presents a deficit which does not meet the agricultural water needs during the period of low water.

Faced with changes in hydroclimatic regimes, farmers, especially those occupying the downstream part of the Oued Melloulou, are aware of the current and future consequences of the risk of water scarcity and floods on their economic and social stability. As a result, forms of adaptation to these changes have been observed. This involves using groundwater to meet irrigation water needs and creating new land on the high terraces or on the plateau, far from the probable effects of floods.

The present study opens up certain research perspectives. First, there are the likely consequences of the future climate and state subsidies for the creation of agricultural land at the expense of local water tables. Second, the probable effects of the TargaOumadi dam, under construction, on the hydrology of Oued Melloulou must be addressed, especially those on water resources in the eastern region and on the future agricultural landscape. Finally, it seems necessary to develop in-depth research, on the one hand, on water losses by evapotranspiration in this region where climate demand is increasingly high, and on the other hand, on the contribution of snowfall in the flow of the Oued Melloulou.

## هيدروولوجية واد ملولو والتغيرات الحالية: اضطراب النظم المناخية والضغط البشري.

### ملخص:

تتناول أطروحة الدكتوراه هذه مشكلة الموارد المائية في بيئة قاحلة في شرق المغرب، حيث المعاناة من حدة الإجهاد المائي وحيث المجتمعات الريفية شديدة التأثر بالظروف البيئية والفقر الشديد. يهدف هذا العمل بالتحديد إلى المساهمة في فهم هيدروولوجية واد ملولو مع التركيز على العوامل الفيزيائية، وتظاهرات تقلب المناخ الحالي والتأثيرات البشرية التي تجسدها الأنشطة الزراعية.

يعتبر الحوض النهري لواد ملولو أحد روافد الضفة اليسرى لمولوية. يمتد على وحدتين طوبوغرافيتين: الأطلس المتوسط الملثوي في الجنوب والجنوب الغربي وسهل كرسيف في الشمال والشمال الشرقي. يلعب هذا الأخير دورًا أساسيًا في توفير مياه الري ومياه الشرب للمناطق التي يعبرها ويساهم بنسبة 40% من صبيب نهر ملوية حيث تبقى الزراعة المسقية هي النشاط الاقتصادي الرئيسي للسكان المحليين.

من أجل بلوغ الأهداف التي حددت في هذه الدراسة، اعتمدنا مقارنة جغرافية تقوم على إجراء دراسة مفصلة للخصائص الفيزيائية للحوض النهري. لننتقل بعد ذلك إلى تحليل التباين الزمني والمكاني للعناصر المناخية بين سنة 1970 و2015، كما قمنا بدراسة التباين الزمني والمكاني للصبيات بين سنة 1990 و2015 بناءً على البيانات المسجلة بمحطات القياس الهيدرومترية وعلى العديد من القياسات الميدانية. وبغرض تسليط الضوء على التأثير البشري على الموارد المائية لوادي ملولو في سياق مناخي متغير، طرحنا أسئلة حول تصور السكان للتغير المناخي الحالي، وطرق إدارة المياه المستخدمة في السقي وذلك من خلال مسح ميداني وكذلك وضع خرائط لتطور استخدامات التربة بين عامي 2000 و2020.

تشير الخصائص الفيزيائية للحوض النهري إلى الشكل الممدود عموماً ونفاذية عالية إلى حد ما، مما يوحي بأن الاستجابة الهيدروولوجية للحوض النهري تميل إلى أن تكون بطيئة، كما تظهر النتائج المستقاة من تحليل السلاسل المطرية السنوية اتجاهاً متزايداً. يمكن تفسير هذه الزيادة من خلال ارتفاع هطول الأمطار الخريفية بشكل دال إحصائياً.

بالمقابل، عرفت التساقطات المطرية في فصل الربيع تناقصاً غير دال إحصائياً. وبهذا شهد التوزيع الموسمي انزياحاً من النظام الربيعي إلى النظام الخريفي خلال العقدين الأخيرين من القرن الحادي والعشرين. إن هذا الأمر قد يكون علامة على اشتداد القحولة، علاوة على ذلك، تُظهر متوسطات درجات الحرارة السنوية تطوراً تصاعدياً مهماً، خاصةً ما يهم متوسطات درجات الحرارة القصوى، مما يولد طلباً مناخياً مرتفعاً على بخار الماء ويرفع من قحولة المجال. كما أن لأمطار الخريف الشديدة، التي صاحبت تطور النظام المطري الحالي، تأثيراً على تدفقات الفيضانات المتصاعدة، مما أدى إلى خسائر مهمة في الأراضي الزراعية على مستوى مصاطب النهر المنخفضة.

من جهة أخرى، تُظهر التدفقات المقاسة أيضاً، انخفاضاً في قيمها من العالية نحو السافلة. ويمكن تفسير ذلك بالنفاذية العالية للسطح، وبالتطور المتسارع للأراضي الزراعية التي تعتمد على مياه الواد في السقي، مما يشكل عجزاً في تلبية الاحتياجات المائية خلال فترات الشح.

في مواجهة هذه التغيرات في النظام المطري، يدرك المزارعون، وخاصة أولئك الذين يحتلون الجزء السفلي من واد ملولو، العواقب الحالية والمستقبلية لخطر ندرة المياه من جهة والفيضانات من جهة أخرى، على استقرارهم الاقتصادي والاجتماعي. نتيجة لذلك، لوحظت أشكال من التكيف مع هذه التغيرات؛ من ضمنها استخدام المياه الجوفية لتلبية احتياجات مياه السقي وإنشاء أراض جديدة على المدرجات العالية أو على الهضبة، بعيداً عن الآثار المحتملة للفيضانات.

تفتح الدراسة الحالية آفاقاً بحثية أخرى منها: أولاً، ما يتعلق بالآثار المحتملة للمناخ مستقبلاً من جهة والإعانات الحكومية لإنشاء الأراضي الزراعية من جهة أخرى، على مناسيب المياه الجوفية المحلية. ثانياً، دراسة التأثيرات المحتملة لسد تارجا أومادي، قيد الإنشاء، على هيدروولوجية واد ملولو وبشكل خاص على الموارد المائية والمشهد الزراعي في المنطقة الشرقية مستقبلاً. ثالثاً وأخيراً، من المفيد إجراء بحث معمق حول فقدان المياه عن طريق التبخر في هذه المنطقة ذات الطلب المناخي المرتفع، وحول مساهمة تساقط الثلوج في تدفق واد ملولو.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

**REMERCIEMENTS:**

Rien ne vaut une sincère reconnaissance envers toutes les personnes qui m'ont épaulé durant cette période de préparation de ma thèse de Doctorat. C'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui m'ont permis, par leur soutien et leur collaboration, de mener à bien ce travail. Ainsi, j'adresse mes remerciements tout spécialement à :

Mon directeur de thèse, le Pr. **Khalid OBDA**. Je tiens à le remercier pour la qualité de son encadrement tant sur le plan scientifique qu'humain et pour la confiance qu'il m'a accordé durant la réalisation de cette thèse. Aucune expression ne pourra traduire la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous.

Je remercie vivement tous les professeurs du laboratoire LAGEA de la FLSH Saïs : Pr. **M'hamed AMYAY**, Pr. **Ali TAOUS**, Pr, **Mohamed LAAOUANE**, Pr. **Abdelatif TRIBAK**, Pr. **Youssef BENBRAHIM**, Pr. **Abdelghani HOUARI** et Pr. **Adbelhamid IDRISSE JANATI**. J'ai eu l'immense plaisir d'être parmi vos étudiants.

J'exprime mes profondes gratitude au Pr. **Mohamed HANCHANE** de la FLSH- Dhar El Mahraz qui m'a beaucoup aidé par ses conseils pertinents, par ses orientations et par son savoir-faire au cours des différentes étapes de ce travail de thèse.

Il est également de mon devoir d'adresser mes chaleureux remerciements au Pr. **M'hamed EL MOULOUDI** de la Faculté Polydisciplinaire de Taza pour sa gentillesse, sa disponibilité à chaque fois que j'en ai besoin de lui.

Je tiens aussi à présenter mes remerciements les plus distingués aux membres de jury de la confiance qu'ils m'ont accordé en acceptant d'examiner ce modeste travail.

A mes très chers Parents et, à travers eux, à tous les modestes agriculteurs des montagnes marocaines, ainsi qu'à mes chers frères et à mes chers amis, j'adresse mes sincères remerciements.

## **Introduction générale**

La rareté de l'eau, avec ses répercussions sociales et économiques profondes, constitue un challenge permanent pour la planète (Claude, 1998). Dans un contexte global, caractérisé par un réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre d'origine anthropique et une forte croissance démographique, accompagnée d'une surexploitation massive des ressources en eau, les milieux arides et semi-arides seront les plus touchés par le risque de la pénurie en eau pendant les années à venir (Servat et al., 2009). Sans doute, ces nouvelles données climatiques et démographiques peuvent amplifier les contraintes hydroclimatiques en milieux arides et semi-arides méditerranéens. En effet, ces derniers sont caractérisés par une forte variabilité pluviométrique, des sécheresses récurrentes, des températures élevées, augmentant le pouvoir évaporant de l'atmosphère qui excède toujours les apports pluviométriques, et des pluies orageuses de courte durée et d'une extrême violence (Kébré, 2013). Ces caractéristiques climatiques générales en zones arides et semi-arides peuvent s'intensifier et s'empirer à moyen et à long terme à cause des actions anthropiques qui agissent négativement sur les différentes composantes des écosystèmes arides et semi-arides méditerranéens, notamment la ressource en eau. Face à de tels changements, des mesures instaurées par l'Etat et des réponses adaptatives développées par la population sont nécessaires à observer et à analyser.

Selon les travaux du réseau méditerranéen d'experts sur les changements climatiques et environnementaux (MedECC) publiés en 2019, le bassin Méditerranéen serait la région du monde la plus touchée par le réchauffement climatique pendant les prochaines années. Ainsi, la partie sud du bassin méditerranéen est classée parmi les régions du monde qui sont déjà affectées par la pénurie en eau selon les travaux de Margat (2008). Vu sa situation géographique, ces conclusions doivent être prises en compte par l'Etat marocain.

Selon le concept agronomique de stress hydrique de Malin Falkenmark (1989), appliqué aux besoins en eau, domestiques, industriels, agricoles et environnementaux, le Maroc est en situation de pénurie en eau chronique avec un stress hydrique assez élevé; le volume moyen des ressources renouvelables en eau, par an et par habitant est  $700 \text{ m}^3$  (Ouhamdouch et al., 2018). Située en dessous du seuil de  $1000 \text{ m}^3$ , la pénurie d'eau qui sévit au Maroc est qualifiée de chronique. Cette situation moyenne doit être nuancée, puisque des valeurs

beaucoup plus faibles et en dessous de cette valeur moyenne sont attendues en régions arides marocaines.

Malgré cette terrible pénurie en eau, la politique économique marocaine s'est basée particulièrement sur le soutien et la modernisation du secteur agricole, grand consommateur des ressources en eau. Cette orientation politique nationale a fait de l'agriculture en irriguée un moteur de croissance économique et un outil de la lutte contre la pauvreté rurale. L'agriculture en irriguée augmente énormément la pression sur la réserve hydrique du pays, surtout que la majorité des périmètres irrigués s'installent sur les plaines ayant un climat aride à semi-aride et fréquemment touchées par des sécheresses chroniques. En plus, les précipitations sont rares, irrégulièrement distribuées dans le temps et dans l'espace, et le nombre d'années en déficit pluviométrique est plus important que celui d'années excédentaires (Driouech, 2010 ; Sebbar et al., 2011 ; Obda, 2004 ; Hanchane, 2016).

Face à cette situation paradoxale, la question de l'eau est aujourd'hui au cœur de la majorité des débats politiques et des préoccupations des pouvoirs publics nationaux. En effet, depuis l'indépendance, l'Etat marocain a réalisé un ensemble d'interventions en matière de projets hydro-agricoles, notamment la construction des barrages, qui visent la mobilisation et le stockage des ressources en eau des années humides pour les exploiter en années déficitaires. D'un autre côté, la problématique de la gestion des ressources en eau mobilise un grand nombre d'acteurs à des échelles différentes et à travers plusieurs institutions publiques. Cependant, une bonne gestion de l'eau commence par une bonne connaissance de cette ressource vitale, notamment son fonctionnement au sein d'un bassin hydrologique. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse qui vise à évaluer les impacts combinés de la variabilité climatique et de l'action anthropique sur les ressources en eaux dans le bassin versant de l'oued Melloulou.

### **Choix et justification du terrain d'étude**

Puisque la recherche géographique n'a pas de signification si elle n'est pas associée à un espace, nous avons choisis le bassin versant de l'oued Melloulou (Fig. 1). Ce dernier est un cas exemplaire pour établir une étude hydrologique, mettre en exergue des problèmes d'aménagement hydroagricole et de gestion des ressources en eau en un milieu aride perpétuellement menacé par une pénurie d'eau. Ce bassin constitue l'affluent le plus

## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

important de la Moulouya avec une contribution de 40% de son débit liquide. Ce dernier joue un rôle stratégique pour irriguer les terres de la basse Moulouya du Maroc Nord-Oriental. Le débit apporté à la confluence avec la Moulouya est parfois plus important que celui de la Moulouya elle-même (Mouhdi, 1993). La confluence avec ce dernier est située en plein centre de la ville de Guercif. Ce territoire drainé par le bassin de Melloulou est connu par ses contrastes physiques, surtout climatique, topographique et biogéographique. Le paysage des vallées est marqué par une expansion des terres agricoles irriguées le long des cours d'eau en plein milieu de terres arides.

L'oued Melloulou prend ses sources sur les versants Nord-Est du Moyen Atlas septentrional. Il draine un bassin versant d'environ 2500 km<sup>2</sup>. Il chevauche sur 2 unités topographiques différentes: le Moyen Atlas plissé au Sud et Sud-Ouest et la plaine de Guercif au Nord et Nord-Est.

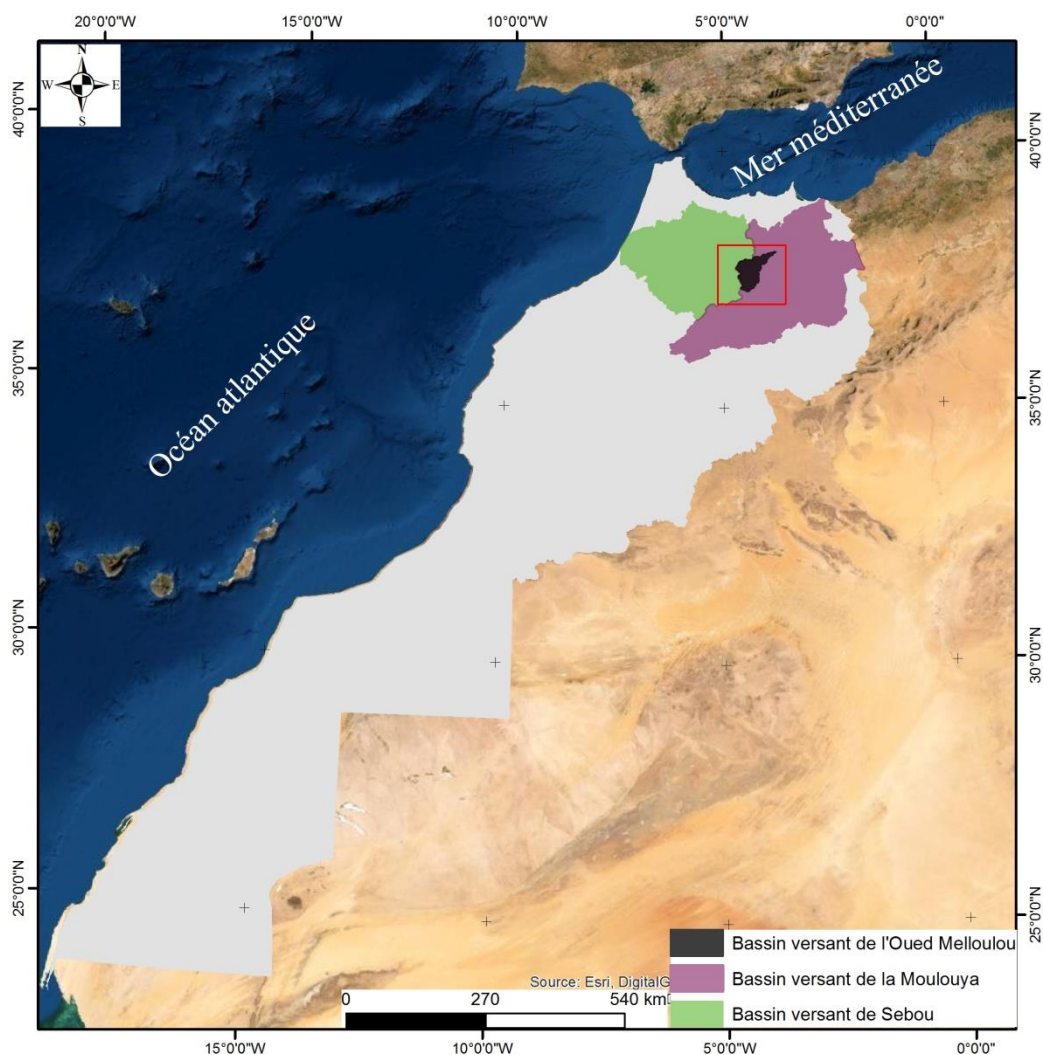
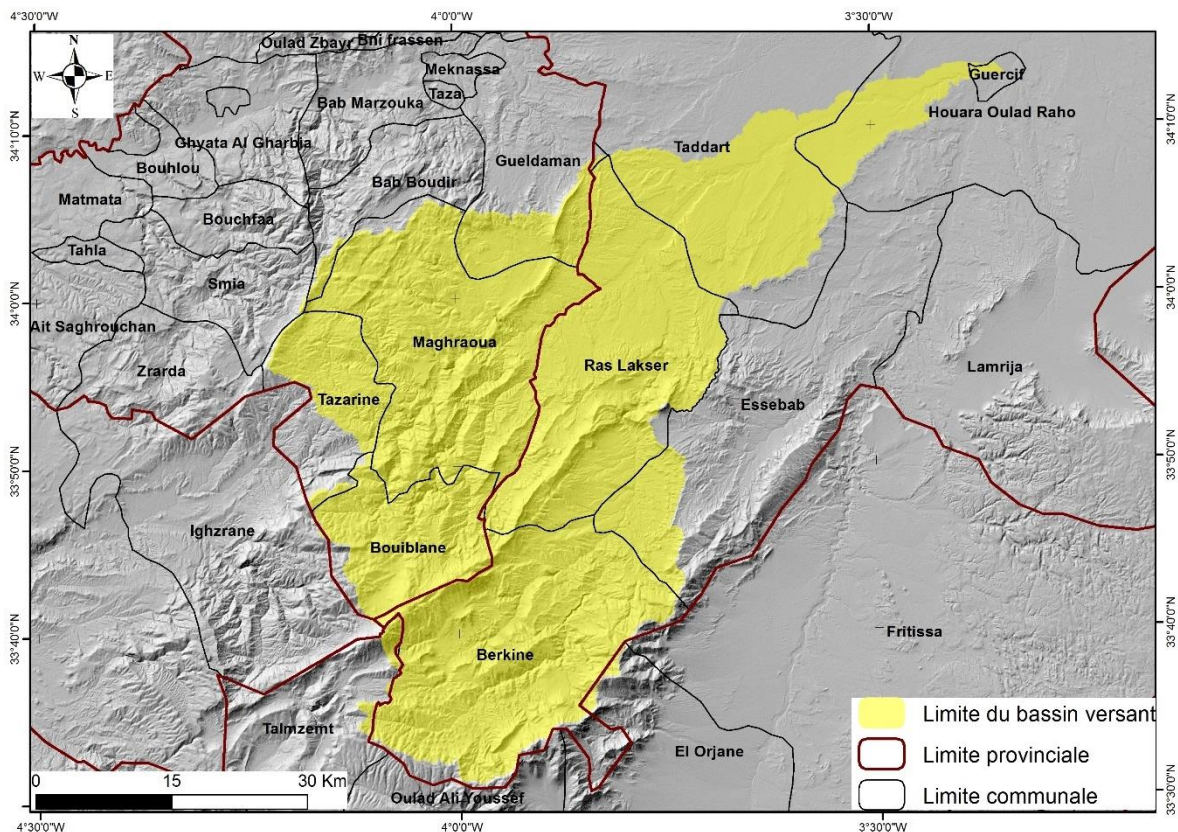


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Il s'étale sur les territoires des provinces de Guercif (1544 km<sup>2</sup>), de Taza (836,5 km<sup>2</sup>) et de Boulemane (15 km<sup>2</sup>), en couvrant respectivement 64,47%, 34,91% et 0,63% de leur superficie totale (Tab. 1).

Les activités économiques principales exercées par les populations sont l'agriculture et l'élevage. Grâce à l'extension des terres agricoles sur la plaine de Guercif et les reboisements pour la régénération des forêts en Amont, la part du pâturage a diminué progressivement pendant ces dernières décennies.



**Figure 2: Unités administratives couvertes par le bassin versant de l'oued Melloulou**

**Tableau 1: Provinces et Communes traversées par le bassin versant de l'oued Melloulou**

Province	Commune	Surface en km <sup>2</sup>	Pourcentage (%)
<b>Guercif</b>	Taddart	267	11.15
	Houara Oulad Rahou	68	2.84
	Berkine	751	31.36
	Ras Lakser	458	19.12
<b>Taza</b>	Gueldamane	97	4.05
	Bouiblanc	175	7.31
	Bab Boudir	31	1.29
	Tazarine	119	4.97
	Maghraoua	414	17.29
<b>Boulmane</b>	Talzemt	15	0.63

### **Problématique de l'étude**

Les précipitations reçues par le pays sont inégalement réparties dans le temps et dans l'espace. Ainsi, la majorité des prévisions futures montrent que le Maroc est classé parmi les régions susceptibles d'être touchées par les changements climatiques actuels. Certaines études internationales indiquent que ces changements du climat pourraient provoquer la disparition de 80% des ressources en eau disponibles pendant les 25 prochaines années (CESE, 2020). De plus, avec ces nouvelles stratégies économiques, basées sur le développement du secteur agricole (le Plan Maroc Vert par exemple), les pouvoirs publics encouragent d'une manière indirecte la surexploitation et le gaspillage de la ressource en eau disponible, notamment celle des nappes souterraines. Par conséquent, le pays souffre d'un déficit hydrique chronique qui atteint aujourd'hui 650 m<sup>3</sup>/hab./an contre 2500 m<sup>3</sup> en 1960 et devrait baisser en deçà de 500 m<sup>3</sup>/hab./an à l'horizon de 2030 (CESE, 2020). Cette situation devient beaucoup plus grave lorsqu'on se rend compte que 80% du territoire marocain est soumis à un climat semi-aride à aride, dont les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 400 et 100 mm

La situation hydrique actuelle nécessite une intervention urgente qui vise la gestion rationnelle et efficiente de l'eau afin d'éviter une crise économique grave et de maintenir la paix sociale pour les prochaines années. Cette paix sociale ne peut être assurée que par un droit d'accès à la ressource et dans un esprit de justice environnementale.

Dans ce contexte, la présente thèse traite la problématique des ressources en eau dans un milieu aride, fortement menacé par le stress hydrique et où les sociétés rurales qui y vivent sont extrêmement vulnérables, fortement pauvres et difficilement résilientes. Plus spécifiquement, ce travail de recherche a pour objectif de contribuer à la compréhension du fonctionnement hydrologique de l'oued Melloulou en mettant l'accent sur les facteurs physiographiques, les aspects du changement climatique actuel et les effets anthropiques qui sont exprimés par les activités agricoles. Ce bassin est localisé, dans sa majeure partie, au niveau du Maroc oriental aride. L'oued Melloulou a une place primordiale dans l'alimentation de toute la région orientale en eau d'irrigation et en eau potable puisqu'il contribue pour 40% de l'écoulement de la Moulouya.

### **Méthodologie adoptée**

Pour répondre aux objectifs précédemment cités, la méthodologie adoptée est organisée en un ensemble d'étapes et regroupe de nombreuses méthodes statistiques, cartographiques et des mesures sur le terrain.

#### **La première étape : le travail bibliographique**

Cette phase comprend l'accès aux études et recherches géographiques antérieurs concernant notre sujet et notre zone d'étude, ainsi qu'aux autres publications réalisées par différents chercheurs dans d'autres domaines. L'objectif de cette étape est d'approfondir nos connaissances et de cadrer scientifiquement notre problématique.

En parallèle, nous avons collecté des données brutes dont nous avons besoin. Elles sont de type administrative, statistique..., en visitant essentiellement l'Agence du Bassin Hydraulique de Moulouya à Oujda, les services régionaux et provinciaux qui appartiennent au Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification, et ceux de la Direction Provinciale de l'agriculture. Les principales données collectées sont de types hydrométéorologiques ; précipitations, températures et débits.

#### **La deuxième étape : le travail du terrain**

Plus particulièrement, dans le domaine de l'hydrologie les données produites par des mesures sur le terrain est une étape importante et cruciale pour consolider notre étude. Dans ce contexte, plusieurs visites de terrain ont été réalisées pour effectuer différentes observations, mesures et prélèvements sur place.

Les moyens et les outils que nous avons utilisés sont généralement ceux disponibles au sein de notre laboratoire de recherche (LAGEA-DD). Également, nous avons exploité une petite partie des résultats d'un questionnaire qui vise la population locale pour comprendre les aspects de gestion des ressources hydriques par la population et la perception de cette dernière à la variabilité et au changement du climat. Ce questionnaire a été réalisé dans le cadre du projet européen ANR COMI-CC "Co-development of methods to utilize uncertain multi-model based information on freshwater-related hazards of climate change (COMICC)", (Voire l'annexe 20).

**La troisième étape : Préparation des bases de données.**

Lors de cette étape, les données statistiques et les séries chronologiques acquises ont été préparées selon des formats exigés par les logiciels de traitement de données utilisés (R, Instat, NEVA, ArcGis...).

**La quatrième étape : *Traitement des données***

Pour aboutir à des résultats significatifs et extraire des conclusions pertinentes, répondant à notre problématique de recherche, les bases de données collectées et préparées précédemment ont été traitées selon différentes méthodes qui répondent aux analyses de tendance et de rupture au niveau des séries hydroclimatiques.

Pour mener à bien ce travail de recherche, on a divisé notre sujet de thèse en 4 chapitres:

- Le premier chapitre traite l'impact des facteurs physiographiques sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant;
- Le deuxième chapitre est consacré pour une analyse statistique assez exhaustive des paramètres pluvio-thermiques qui influencent l'écoulements fluviale;
- Le troisième chapitre se focalise sur l'analyse statistique et fréquentielle des données hydrométriques et s'intéresse aux phases hydrologiques d'étiages et de crues. Cela nous permet de comprendre la tendance des écoulements. Aussi, les résultats de jaugeage des débits mesurés et de la bathymétrie prélevés au niveau du lac de Tameda ont été présentés;
- En réponse aux variations hydroclimatiques récentes, le quatrième chapitre expose la réponse des agriculteurs en matière d'exploitation des ressources en eau pour l'irrigation et met en évidence l'évolution des terres agricoles, la dynamique fluviale et la perte des terres agricoles au niveau des basses terrasses en un milieu à caractère hydroclimatique extrêmement variable.

## CHAPITRE I :

### CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS

---

#### Sommaire

---

Introduction du chapitre.....	14
1 Délimitation du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	14
2 Indices de forme.....	14
3 Analyse du relief.....	23
4 Indices de reliefs.....	27
5 Réseau hydrographique.....	30
6 Profils en long.....	36
7 Estimation des indices hydromorphométriques pour les 11 sous bassins.....	39
8 Contexte structural et lithologique du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	43
9 Couverture végétale du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	46
Conclusion du chapitre.....	48

## **Introduction du chapitre**

L'analyse des caractéristiques physiques d'un bassin versant est une étape indispensable pour une étude hydrologique complète et fiable. Elle permet de caractériser les principaux facteurs physiques et leur intervention dans les processus de l'écoulement. En effet, les interactions de l'ensemble de ces facteurs déterminent le comportement hydrologique du bassin versant. Pour cet objectif, nous allons mettre en relief une caractérisation de la morphométrie, de l'énergie du relief, de la perméabilité, du réseau hydrographique et du couvert végétal. Un groupe d'indices, de formules empiriques et de méthodes ont été appliqués sur le bassin versant de l'oued Melloulou.

### **1 Délimitation du bassin versant de l'oued Melloulou**

Le bassin versant de l'oued Melloulou est un affluent de la Moulouya. Il se situe à l'extrême ouest de ce dernier, délimité par le Sebou au niveau de sa partie ouest et sud-ouest. Puisqu'une bonne délimitation du bassin versant permet d'une analyse fiable des caractéristiques morphométrique du bassin versant, la délimitation de ce dernier a fait l'objet d'un travail qui n'est pas facile. Cette opération a été effectuée à base du modèle numérique de terrain (MNT) de 30 mètres de résolution spatiale, téléchargeable sur le site de l'Institut d'études géologiques des États-Unis, et complétée par une mosaïque des cartes topographiques et des investigations sur le terrain.

Cette délimitation nous a permis d'analyser : la forme du bassin, sa topographie, son énergie de relief, son réseau hydrographique...

### **2 Indices de forme**

Les indices de forme se basent sur la comparaison de la forme du bassin versant aux figures géométriques telles que le carré, le cercle, l'ellipse.... Ils permettent de mesurer le degré d'allongement du bassin à partir de sa longueur axiale ou de la longueur maximale de son cours d'eau principal. Les indices de forme les plus utilisés sont :

#### **2.1 Indice de Gravius**

Le coefficient de compacité, proposé par Gravelius en 1914, repose sur la comparaison de la forme d'un bassin à un autre bassin de forme circulaire. Il est défini comme le rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface (Wisler & Brater, 1959; Roche,

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

1963; Ward, 1975; OMM, 1996 ; Bendjoudi et al., 2002). Le coefficient de compacité de Gravelius  $K_c$  s'exprime par :  $K_c = P \cdot (2 \pi \cdot A)^{1/2} - 1 = 0,28 \cdot P / \sqrt{A}$

*Avec P et A : sont respectivement le périmètre et la surface du bassin versant*

Plus la valeur de  $K_c$ , calculée pour un bassin est proche de 1, plus la forme de ce dernier tend vers une forme géométrique arrondie et proche du cercle (Tab. 2). Plus le coefficient a s'agrandit, et plus le bassin est moins compact (Ibiate, 2004). Pour un même apport pluviométrique, un bassin d'une forme allongée favorise une faible réponse hydrologique et des faibles débits de pointe. Cependant, un bassin avec une forme moins allongée provoque un débit de crue plus élevé et un court temps de concentration (Lambert, 1996).

**Tableau 2 : Correspondance entre la valeur de  $K_c$ , la forme et le type de réponse hydrologique attendue. Source : Roche, 1963 in Obda, 2004.**

Indice	Forme	Réponse
$K_c < 1,25$	Bassin compact	Réponse rapide
$1,25 < K_c < 1,5$	Bassin de forme moyenne	Réponse moyenne
$K_c > 1,5$	Bassin allongé	Réponse plus lente

## 2.2 Coefficient de circularité de Miller (1953)

A l'inverse de celui de Gravelius, V.C. Miller (1953) définit un indice de circularité ( $I_c$ ) rapportant le périmètre d'un bassin au cercle qu'a une circonférence identique. Il s'exprime par :

$$I_c = 4\pi \cdot A \cdot P^{-2} = 12,57 \cdot A \cdot P^{-2}$$

La valeur de 1 identifie un bassin parfaitement circulaire ; la valeur de 0,785 est valable pour un bassin carré (Douvinet, 2008).

## 2.3 Rectangle équivalent

Il est appelé aussi rectangle de Gravelius. La méthode du rectangle équivalent a été créée par Gravelius (1914) et modifiée après par Péguy (1942). Elle consiste à transformer géométriquement le bassin à un rectangle ayant la même surface et le même périmètre. Cette méthode est basée sur la surface du bassin (A) et son indice de compacité de Gravelius

(Kc ). Les grandeurs du rectangle équivalent, L : la longueur et l : la largeur, ont été calculées selon les équations suivantes :

$$L = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{K_c \sqrt{A}}{1.12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right]$$

La connaissance de la valeur d'une grandeur et de la surface du bassin étudié nous permet de calculer directement la valeur de l'autre selon l'équation suivante :

$$A = L * l$$

#### 2.4 Indice de forme d'Horton

Horton (1932) propose un indice de forme (Rf) en rapportant la surface (A) du bassin étudié à celle d'un carré dont les côtés sont l'équivalent de la longueur du drain principal (Lb). Il est calculé selon la formule :

$$Rf = A / (Lb)^2$$

Pour un carré, l'indice (Rf) est égal à 1, et pour un rond, (Rf) équivaut à 0,886. Deux bassins de forme identique, quelle que soit leur taille, auront un (Rf) identique, ce qui permet, par conséquent, de caractériser leurs formes indépendamment de leurs surfaces (Douvinet, 2008).

#### 2.5 Indice de forme inverse

Le facteur de forme inversé défini par S.K. Jena et K.J. Tiwari (2006), est la longueur du drain principal mise au carré et divisée par la surface totale du bassin. J. Llamas (1993) recommande l'utilisation de la distance à vol d'oiseau, pour ne pas tenir compte de la sinuosité du drain principal lors du calcul du coefficient de forme Kf. Il est calculé selon la formule :

$$Kf = (Lb)^2 / A.$$

Avec "Lb" : la longueur à vol d'oiseau du drain principal et A : la surface totale du bassin

### 2.5.1 Indice d'élongation

L'indice d'élongation (**IE**) (Saam, 1998) ou (**Er**) (Liébault et al., 2002), est le rapport entre le périmètre (**P**) d'un bassin (ou la longueur maximale **Lb**) et la racine carrée de sa superficie (**A**) :

$$\begin{aligned} 1 : IE &= P / (\sqrt{A}) \\ 2 : Er &= Lb / \sqrt{A} \end{aligned}$$

Cet indice nous permet de mesurer l'allongement uniquement à partir du périmètre. Pour un bassin carré parfait, **IE** est égal à 4. En revanche, plus la valeur de **IE** est élevée, plus le bassin est allongé (Samm, 1998 ; Moussa et al., 1996 ; Liébault et al., 2002).

### 2.5.2 Indice d'allongement ou d'élanement du bassin

L'indice d'allongement **Re**, défini par (Ibiate, 2004), est le rapport entre le diamètre du cercle ayant la même surface (**A**) que le bassin, et la longueur maximale de ce dernier (**Lb**). Il est calculé selon la formule :

$$Re = 1,128 * (\sqrt{A}/Lb)$$

Pour un bassin rond, l'indice d'allongement **Re** est égal à 1, tandis que la valeur diminue pour des bassins élancés (**Re** ≈ 0,6).

### 2.6 Indice d'allongement moyen

L'indice d'allongement moyen (**Rem**), proposé par (Réméniéras, 1986), est le rapport entre le plus long parcours de l'eau **E** entre la périphérie et l'exutoire du bassin, et la racine carrée de sa surface **A**. Il est calculé selon la formule :

$$Rem = E / (\sqrt{A})$$

### 2.7 Indice d'allongement à partir du rectangle équivalent

L'indice d'allongement à partir du rectangle équivalent (**Ia**), est le rapport entre la longueur **L** et la largeur **I** du rectangle équivalent (Serrat et Depraetere., 1997).

$$Ia = L/I$$

### 2.8 Indice de développement

L'indice de développement **D**, permet de comparer le périmètre effectif d'un bassin au périmètre minimal compte tenu de sa superficie (Saam, 1998). Il croise le périmètre (**P**) d'un bassin au périmètre minimal ayant la même surface (**A**) que le bassin. Il est calculé selon la formule :

$$D = P / ((A / \pi) * 2\pi)$$

## 2.9 Indice d'étalement du bassin

L'indice d'étalement du bassin (**le**) rapporte la surface du bassin à l'indice d'élongation (**IE**), défini à partir de cette même surface **A** (Horton, 1932). Il est calculé selon la formule :

$$le = A / (\pi (0,5 * IE)^2)$$

## 2.10 Résultats des indices de forme

Le tableau 3 résume les résultats des indices de forme calculés au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou. Ces résultats montrent que le bassin objet de notre étude présente une forme allongée. En effet, l'indice de compacité estimé est de 2.5, supérieur à 1. La longueur du rectangle équivalent est 16 fois la largeur. Le coefficient de circularité est de 0.16 correspond à une valeur très faible. L'indice d'allongement ou d'élanement du bassin est de 0.57. La valeur de l'indice de forme inverse est importante, 3.16... toutes ces valeurs confirment la forme allongée de ce dernier.

**Tableau 3 : Indices de forme, calculés pour le bassin versant de l'Oued Melloulou**

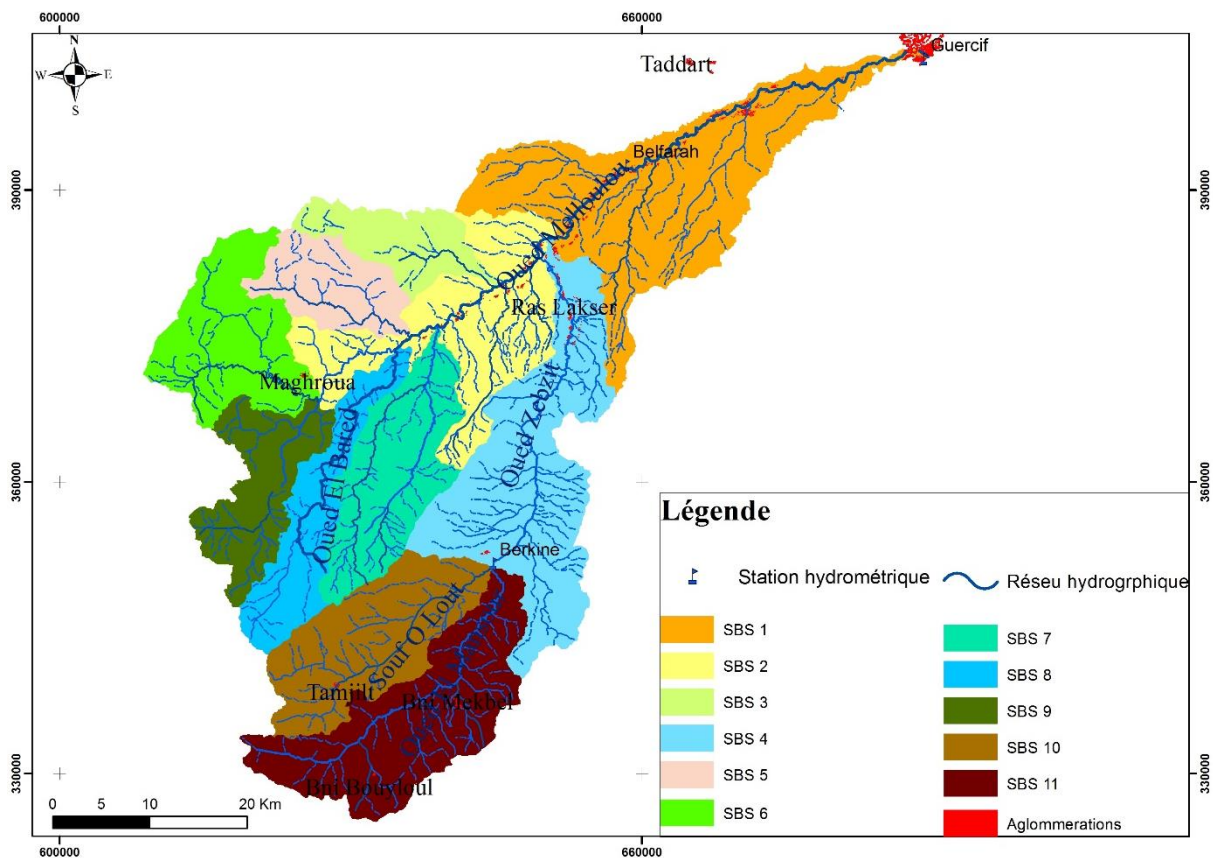
Indices	Formule	Valeurs
Indice de forme/ Gravilius	$Kc = P \cdot (2 (\pi \cdot A)^{1/2})^{-1} = 0,28 \cdot P \cdot (A)^{1/2}$	2.49
Longueur du rectangle (km)	$L = (Kc \sqrt{A}) / 1.12 (1 + \sqrt{1 - (4.12 / Kc)^2})$	212.97
Largeur du rectangle (km)	$L = (Kc \sqrt{A}) / 1.12 (1 - \sqrt{1 - (4.12 / Kc)^2})$	12.03
Coefficient de circularité	$lc = 4\pi \cdot A \cdot P^{-2} = 12,57 \cdot A \cdot P^{-2}$	0.16
Indice ou facteur de forme (indice d'Horton)	$Rf = A / (Lb)^2$	0.26
Indice de forme inverse	$Kf = (Lb)^2 / A$	3.16
Indice d'élongation	$IE = P / (\sqrt{A})$ ou $Er = Lb / \sqrt{A}$	8.89
Indice d'allongement ou d'élanement du bassin	$Re = 1,128 * (\sqrt{A} / Lb)$	0.57
Indice d'allongement moyen	$Rem = E / (\sqrt{A})$	1.98
Indice d'allongation à partir du rectangle équivalent	$la = L/l$	17.70
Indice de développement	$D = P / ((A / \pi) * 2\pi)$	0.09
Indice d'étalement du bassin [le]	$le = A / (\pi (0,5 * IE)^2)$	41.32

Les résultats obtenus nous permettent de conclure que, théoriquement, la réponse hydrologique tend à être lente, favorisant une érosion faible et un temps de concentration des eaux de ruissellement plus long. Cependant, le comportement hydrologique ne dépend pas uniquement de la forme morphologique du bassin, surtout que, le bassin de Melloulou

## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

couvre une superficie d'environ 2500 km<sup>2</sup>. Ainsi, l'étude de sa morphométrie dans sa globalité n'affiche pas strictement la réalité du terrain vu son hétérogénéité morphométrique, lithologique, structurale...

Pour cette raison nous avons divisé le bassin versant en 11 sous-bassins, de tailles moyennes, plus ou moins homogènes d'un point de vue lithologique, topographique, géologique et de la couverture végétale (Fig. 3). Le cours d'eau principal d'un sous bassin moyen est d'ordre 4 ou plus selon la classification de Strahler.



**Figure 3 : Sous-bassins versants constituant le bassin de l'oued Melloulou**

Les sous bassins, affichés sur la carte (Fig. 3), présentent les principaux affluents de l'oued Melloulou ou les affluents de ses affluents. Le tableau 4 affiche les noms des sous bassins selon les codes qui sont assignés sur la figure 3.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**Tableau 4 : Noms des sous bassins affichés sur la carte**

Code du Sous bassin	SBS 1	SBS 2	SBS 3	SBS 4	SBS 5	SBS 6	SBS 7	SBS 8	SBS 9	SBS 10	SBS 11
Nom	Bas Melloulou	Moyen Melloulou	Lahmer	Zebzit	Larbaa	Maghraoua	Taghzout	El Bared	Timorghout	Olout	El Mansour

Les résultats d'estimation des indices de forme pour chaque sous bassin versant sont assemblés dans le tableau 5. Les valeurs de l'indice de compacité de Graviliuce (Kc), estimées pour nos sous-bassins versants, varient de 1.5 à 2.32 (Tab 5). Cette observation montre que les sous- bassins versants sont loin de prendre une forme circulaire ou d'un carré. Ils ont par conséquent une forme allongée. Les sous-bassins fortement allongés avec une valeur de Kc supérieur à 2 sont les SBS 1, 2, 4 et 8. Ils couvrent une superficie de 1295 km<sup>2</sup>, ce qui représente 52 % de la superficie totale du bassin versant de l'oued Melloulou. Les sous bassins d'ordre 3, 6, 7, 9 et 11 ont des valeurs Kc supérieures à 1.6 avec une superficie totale de 960 km<sup>2</sup>, soit 38.4% de la surface totale du bassin. Ils présentent une forme allongée. Seulement les deux sous bassins 5 et 10 ont un indice Kc entre 1.5 et 1.6 (Fig. 4).

La carte de spatialisation de l'indice de Kc montre que les sous bassins les plus allongés sont situés dans la partie aval, qui reçoit les valeurs les plus faibles des précipitations. Tandis qu'en amont, l'allongement des sous bassins est modéré. Sur les versants les plus arrosés. La réponse hydrologique sera donc plus rapide et plus violente en amont qu'en aval.

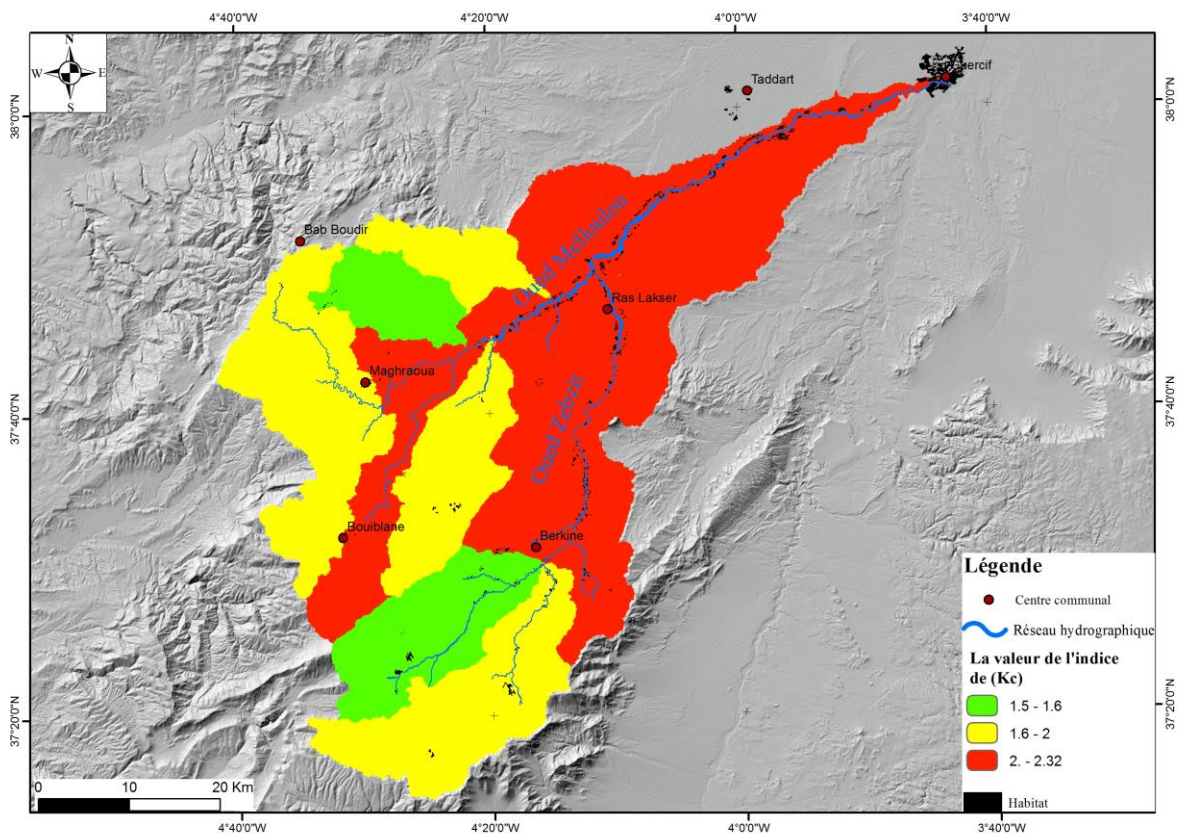
Presque le même constat a été signalé pour les résultats de l'indice d'Horton. Les valeurs estimées varient entre 0.07 et 0.63, inférieures à 0.89. Cela nous permet de conclure que les sous bassins des affluents de l'Oued Melloulou ont une forme allongée ; 90% des sous bassins présentent des valeurs inférieures à 0.4 (Fig. 5).

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

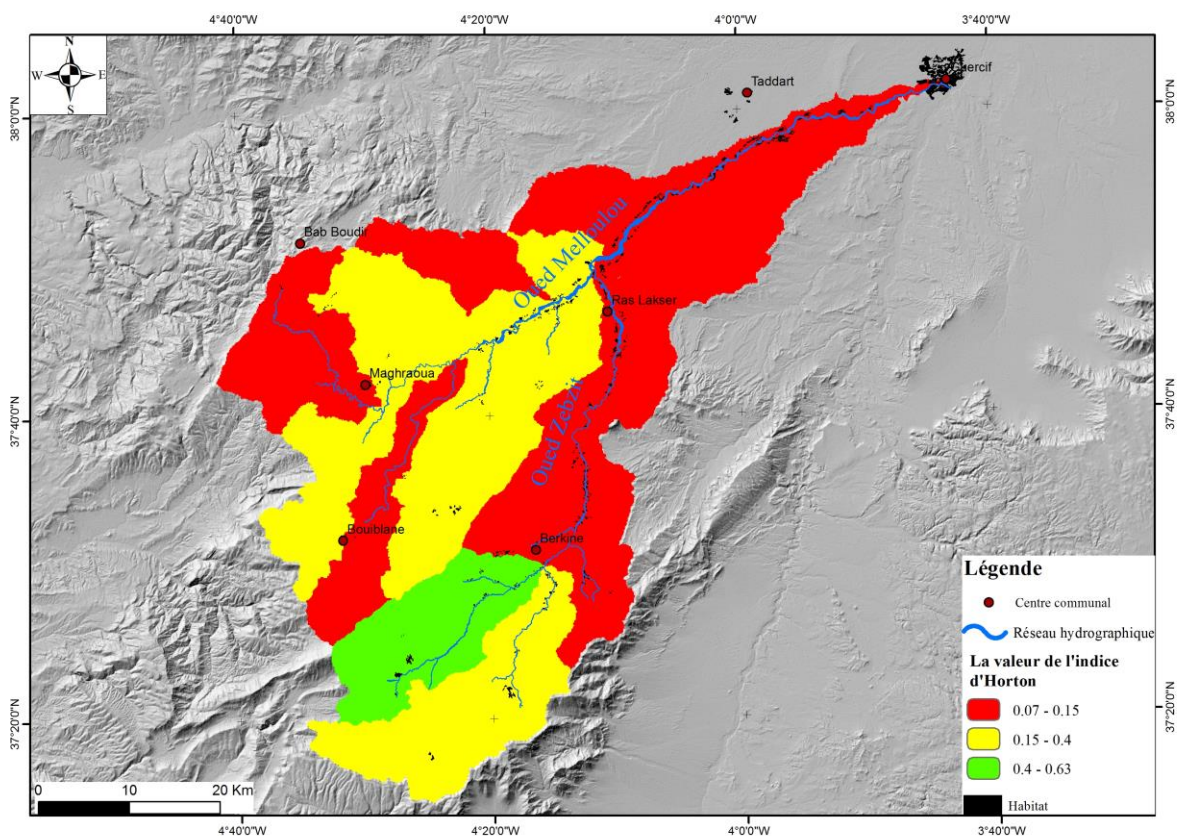
**Tableau 5 : Résultats des indices de formes, calculés pour les sous bassins versants de l'Oued Melloulou**

	SBS 1	SBS 2	SBS 3	SBS 4	SBS 5	SBS 6	SBS 7	SBS 8	SBS 9	SBS 10	SBS 11	
<b>Indices de FORME</b>	Indice de forme/ Gravilius	2.32	2.18	1.82	2.09	1.55	1.61	1.60	2.17	1.75	1.50	1.63
	Longueur du rectangle (km)	82.52	60.36	29.51	66.88	25.34	34.78	35.14	44.10	34.07	33.71	43.60
	Largeur du rectangle (km)	5.48	4.64	3.49	5.62	4.66	5.72	5.86	3.40	4.43	6.79	6.90
	Coefficient de circularité	0.18	0.21	0.30	0.22	0.41	0.38	0.38	0.21	0.32	0.44	0.37
	Indice ou facteur de forme (indice d'Horton)	0.12	0.27	0.13	0.11	0.24	0.08	0.24	0.07	0.27	0.63	0.18
	Indice de forme inverse	5.42	2.60	4.53	5.08	2.75	1.81	4.37	7.71	3.50	3.42	3.19
	Index d'élongation	8.28	7.77	6.50	7.48	5.52	5.74	5.71	7.76	6.27	5.35	5.82
	Indice d'allongement ou d'élanement du bassin	0.40	0.59	0.40	0.38	0.56	0.32	0.56	0.31	0.59	0.90	0.48
	Indice d'allongement moyen	2.85	1.91	2.81	2.99	2.03	3.58	2.02	3.67	1.91	1.26	2.35
	Indice d'allongement à partir du rectangle équivalent	15.07	13.01	8.45	11.90	5.44	6.08	5.99	12.96	7.69	4.96	6.31
	Indice de développement	0.19	0.23	0.32	0.19	0.25	0.20	0.20	0.32	0.25	0.18	0.17
	Indice d'étalement du bassin [Ie]	8.40	5.91	3.10	8.57	4.93	7.69	8.04	3.18	4.90	10.18	11.31

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**



**Figure 4 : Valeurs de l'indice de KC calculées et spatialisées pour les 11 sous-bassins versants**



**Figure 5 : Valeurs de l'indice d'Horton calculées et spatialisées pour les 11 sous-bassins versants**

### 3 Analyse du relief

Dans un bassin versant, de nombreux paramètres climatiques et bioclimatiques sont strictement liés à la variation des altitudes, des expositions des versants et des pentes. En effet, cette variation d'altitude contrôle les variations spatiotemporelles des températures, des précipitations et par conséquent influe sur le régime hydrologique. Ainsi l'énergie de relief agit sur la vitesse d'écoulement. Ainsi, la description et l'analyse de relief sont importantes pour une étude hydrologique fiable.

#### 3.1 Hypsométrie du bassin versant de l'Oued Melloulou

L'Oued Melloulou draine un impluvium assez important. La diversité des régions parcourus par son réseau hydrographique confère un aspect hypsométrique très varié (Mouhdi, 1993). Les altitudes dans le bassin versant oscillent entre 360 m au niveau de l'exutoire, situé dans la plaine de Guercif, et 3300 m au sommet de Jbel Bounacer et Jbel Bouiblanc. La carte ci-dessus, réalisée à partir d'un MNT de 30 mètres de résolution, montre une augmentation des valeurs d'altitude du nord-est vers le sud (Fig. 6).

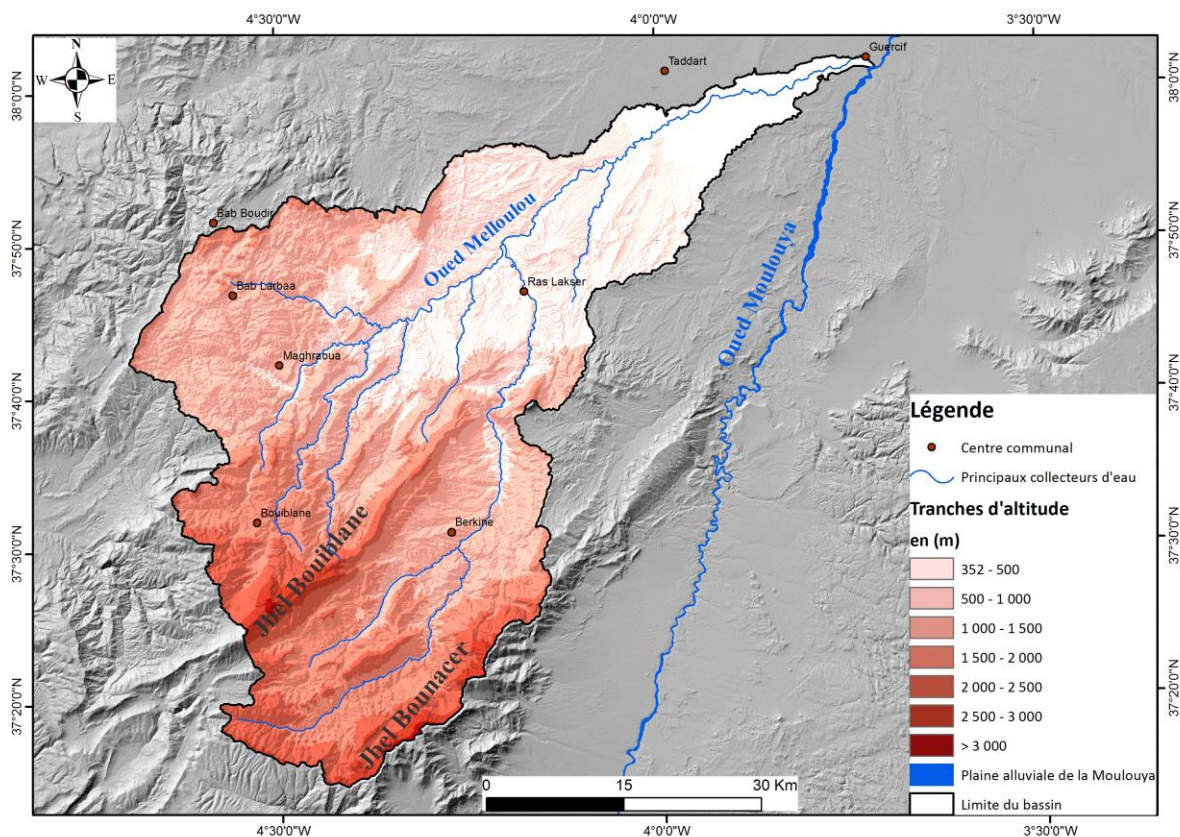


Figure 6 : Tranches altitudinales dans le bassin versant de l'Oued Melloulou

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Les résultats du tableau 6 révèlent que la classe d'altitude la plus fréquente dans le bassin est celle de 1000 – 1500 m. Elle représente 33.6% de la surface totale. Les zones ayant des altitudes inférieures à 1000 couvrent également 34.9 % de la surface totale du bassin. Tandis que, la superficie occupée par les altitudes, supérieures à 2500 m, est d'environ 2.6%. Généralement ces sommets montagneux reçoivent des précipitations neigeuses.

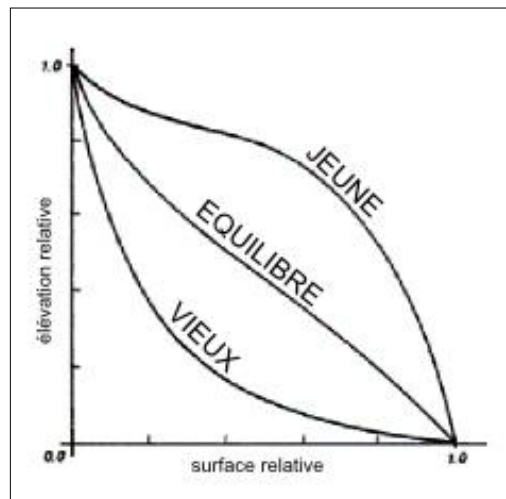
Cette répartition des tranches altitudinales nous a fourni déjà une vision générale sur la distribution des pentes dans le bassin. Il semble qu'il y a une chute de pente vers le nord-est. Cela peut provoquer un amortissement de vitesse d'écoulement.

**Tableau 6 : Répartition des altitudes dans le bassin versant de l'Oued Melloulou**

Tranche d'altitude	Surface en %	Surface Si km <sup>2</sup>	Si cumulée km <sup>2</sup>	Fréquence en %
<500	4.91	127.00	127.00	4.91
500-1000	30.01	777.00	904.00	34.92
1000-1500	33.60	870.00	1774.00	68.52
1500-2000	18.93	490.00	2264.00	87.45
2000 - 2500	9.85	255.00	2519.00	97.30
2500 - 3000	2.51	65.00	2584.00	99.81
>3000	0.19	5.00	2589.00	100.00

### 3.2 Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique d'un bassin versant est une représentation graphique des tranches altitudinales en fonction des superficies cumulées (Taous, 2005). Cette dernière fournit déjà pas mal de renseignements qualitatifs sur l'allure du relief (Roche, 1963). Elle offre aussi une idée synthétique sur le temps de concentration et le débit de pointe. Ainsi, la forme de la courbe hypsométrique peut être utilisée pour déterminer la situation érosive d'un bassin et prédire son rendement sédimentaire.



**Figure 7 : Etat de maturité du relief des bassins versants selon la forme de la courbe hypsométrique. Cité par Laabidi et al., 2016.**

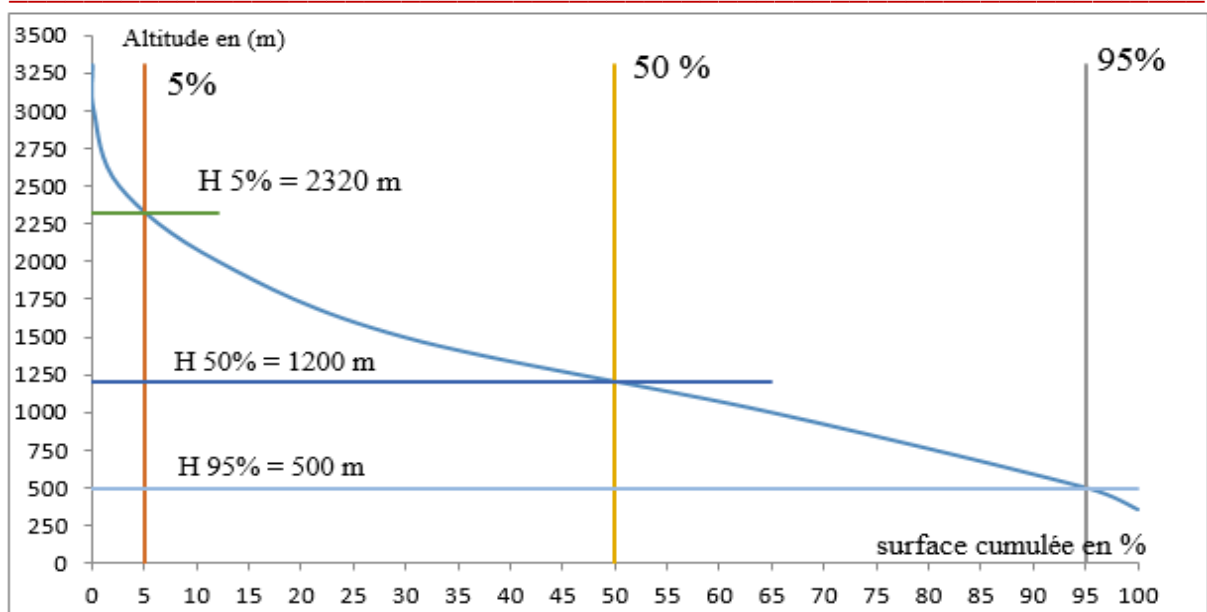


Figure 8 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Melloulou.

Pour le bassin versant de l'oued Melloulou, la courbe affiche une pente forte sur les sommets montagneux du Moyen Atlas situés en amont, où les altitudes dépassent les 2000 m. Cette forte pente favorise une vitesse d'écoulement superficiel élevée et, par la suite, une forte érosion verticale. Cette particularité explique les profondeurs des oueds en amont (Photo. 1).



Photo 1 : Oued Melloulou à 200 m en aval de la source de l'oued Elbared

La pente commence à diminuer lentement dans la zone transitoire, entre le Moyen Atlas et la plaine de Guercif. Après ce point, un amortissement de la pente est constaté. Cette situation provoque une faible vitesse d'écoulement, causant des débordements fréquents des eaux sur les terrasses agricoles. Ainsi, cette faible pente provoque l'érosion latérale lors des crues, notamment au niveau du Moyen Melloulou. Cette partie du bassin est couverte

par des affleurements lithologiques friables. Il s'agit des marnes bleues de miocène et des dépôts quaternaires (Photo. 2).



**Photo 2 : Marnes de miocène au nord de Ras Lakser**

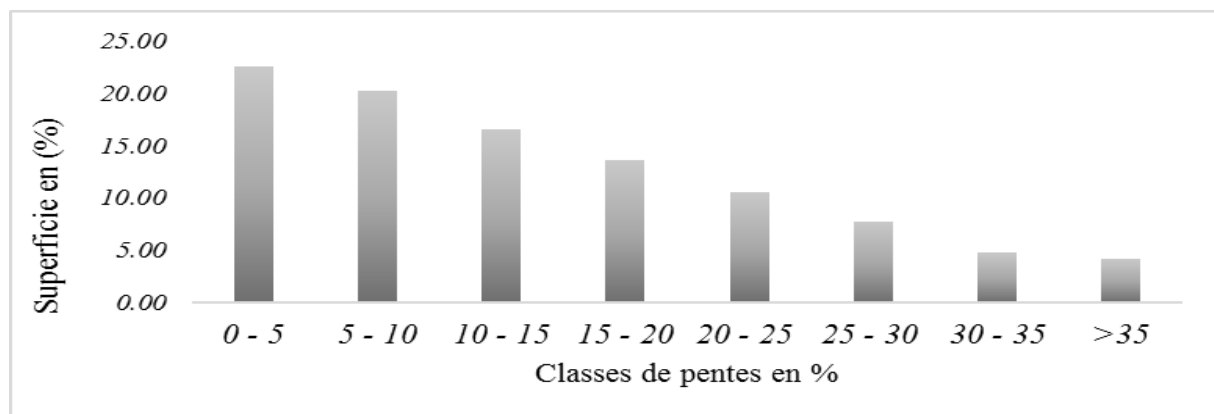
**Photo 3 : Exemple des terrasses agricoles dans la même zone**

### 3.3 Répartition des pentes dans le bassin versant de l'oued Melloulou

Comme on l'a déjà cité, la pente est un élément déterminant de la vitesse d'écoulement, et par la suite de l'énergie d'érosion hydrique.

La figure 10 affiche un affaiblissement des valeurs de la pente de sud et sud-ouest vers le nord et nord-est. Les fortes pentes, supérieures à 35 %, sont observées au niveau des versants des hautes montagnes, ainsi qu'au niveau des crêtes de la continuité du Moyen Atlas Plissé au nord-est. Alors que les pentes faibles, inférieures à 10 %, sont concentrées en aval du bassin.

Généralement, pour la totalité de l'aire d'étude, les pentes sont assez faibles avec une dominance de la classe inférieure à 10% qui occupe 43% de la superficie totale (Fig. 9). Cette superficie diminue avec l'augmentation des valeurs de pente pour atteindre 4% seulement pour la classe supérieure à 35% (Fig. 10).



**Figure 9 : Pourcentages des superficies occupées par les classes des pentes**

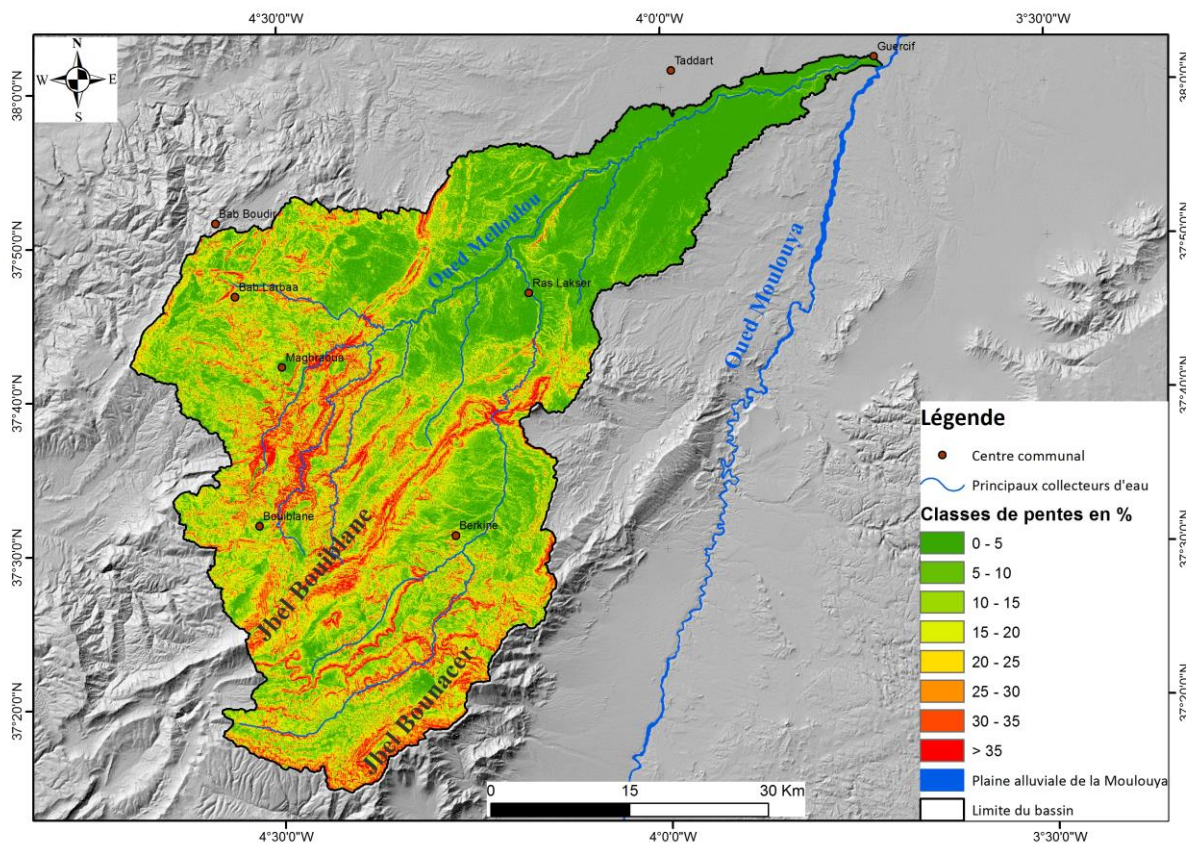


Figure 10 : Carte des pentes du bassin versant de l'oued Melloulou

## 4 Indices de reliefs

### 4.1 Altitudes maximales et minimales

Elles sont obtenues directement à partir des cartes topographiques ou du modèle numérique de terrain. L'altitude maximale d'un bassin versant représente celle du point le plus élevé, tandis que l'altitude minimale correspond au point le plus bas, qui est situé généralement à l'exutoire.

### 4.2 Dénivelé théorique (Dt)

Le **Dt** est le rapport entre l'altitude maximale et l'altitude minimale, il s'écrit selon la formule suivante :

$$Dt = (H_{max} - H_{min}).$$

### 4.3 Altitude moyenne

On peut définir l'altitude moyenne comme suit :

$$H_{moy} = \sum A_i \cdot h_i / A$$

Avec : **H<sub>moy</sub>** : altitude moyenne du bassin [m] ; **A<sub>i</sub>** : aire comprise entre deux courbes de niveau [km<sup>2</sup>] ; **h<sub>i</sub>** : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m] ; **A** : superficie totale du bassin versant [km<sup>2</sup>].

L'altitude moyenne est peu représentative de la réalité. Toutefois, elle est parfois utilisée dans l'évaluation de certains paramètres hydrométéorologiques ou dans la mise en œuvre des modèles hydrologiques.

#### 4.4 Altitude médiane

L'altitude médiane (**H<sub>me</sub>**) correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière.

#### 4.5 Indice de soulèvement (R<sub>t</sub>)

Créé par Schmidt et Dikau (2000), l'indice de soulèvement (**R<sub>t</sub>**) est le rapport entre l'altitude moyenne du bassin **H<sub>moy</sub>** et sa surface totale (**A**). Il tient compte de la taille du bassin.

$$R_t = H_{moy} / A$$

#### 4.6 Indice de pente globale I<sub>g</sub>

L'indice de pente globale est plus simple à évaluer que les autres indices de pentes, surtout pour des études n'ayant pas une grande importance scientifique. Il est calculé après construction de la courbe hypsométrique qui donne le pourcentage de la superficie du bassin versant située au-dessus d'une altitude donnée en fonction de cette même altitude. Puisque dans un bassin, la pente diminue de l'amont vers l'aval, l'indice **I<sub>g</sub>** diminue lorsque la surface augmente (Faye, 2014). La formule de **I<sub>g</sub>** est la suivante :

$$I_g = D/L$$

Avec : **D** : est la dénivelé utile = H<sub>5%</sub> - H<sub>95%</sub> (extrait de la courbe hypsométrique) ; **L** : étant la longueur du rectangle équivalent.

Il sert de base à une des classifications de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer (O.R.S.T.O.M) pour les bassins versants d'une superficie importante.

**Tableau 7 : Classification de de l'énergie de relief en fonction de l'indice de pente globale**

R1	Relief très faible	$lg < 0,002$
R2	Relief faible	$0,002 < lg < 0,005$
R3	Relief assez faible	$0,005 < lg < 0,01$
R4	Relief modéré	$0,01 < lg < 0,02$
R5	Relief assez fort	$0,02 < lg < 0,05$
R6	Relief fort	$0,05 < lg < 0,1$
R7	Relief très fort	$0,1 < lg$

#### 4.7 Indice de pente $I_m$

La pente moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours d'écoulement et, par la suite, sur le temps de concentration qui influe directement le débit de pointe lors d'une averse. C'est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin. La méthode utilisée pour l'estimation de la pente moyenne est celle proposée par Carlier et al (1964). La méthode est donnée par la relation suivante :

$$I_m = \frac{D * L}{A}$$

$I_m$  : pente moyenne [m/km ou 0/00] ;  $L$  : longueur totale des courbes de niveau [km] ;  $D$  : équidistance entre deux courbes de niveau [m] ;  $A$  : surface du bassin versant [km<sup>2</sup>].

#### 4.8 Dénivelée spécifique $D_s$

Le dénivelé spécifique ( $D_s$ ) est l'indice le plus recommandé et le plus utilisé pour l'évaluation de l'énergie du relief (Lasri, 2015). Elle est le rapport entre l'indice de pente utile et la racine carrée de la surface du bassin.

$$D_s = PU\sqrt{A}$$

Avec  $PU = (DU/L)*100$  ;  $DU = H5\% - H95\%$  ;  $L$  : la longueur du rectangle équivalent ;  $A$  : est la superficie totale du bassin

La classification la plus répondue dans la bibliographie est résumée dans le tableau 8.

**Tableau 8 : Correspondance type de relief et le dénivelé spécifique Source : Roche, 1963 in Obda (2004).**

$D_s < 10$	Relief très faible
$10 < D_s < 25$	Relief faible
$25 < D_s < 50$	Relief assez faible
$50 < D_s < 100$	Relief modéré
$100 < D_s < 250$	Relief assez fort
$250 < D_s < 500$	Relief fort
$500 < D_s$	Relief très fort

#### 4.9 Résultats des indices de relief

Le bassin versant de l'oued Melloulou présente un grand dénivelé entre ses deux points extrêmes, oscillant entre 360 m à la confluence de l'oued Melloulou avec celui de Moulouya, et 3350 m sur le point le plus élevé de Bounacer. Le dénivelé théorique dépasse 2900 m. (Tab. 9)

**Tableau 9 : Résultats des indices de relief pour la totalité du bassin versant**

Indices	Formule	Valeurs
L'altitude maximale (m)		3350
L'altitude minimale (m)		360
L'altitude moyenne (m)	$H_{moy} = \sum A_i \cdot p_i / A$	1800
L'altitude médiane (m)		1200
Le dénivelé théorique	$D_t = H_{max} - H_{min}$	2990
La pente moyenne m/km	$I_m = \frac{D * L}{A}$	13,9
Le dénivelé Utile	$DU = H_{5\%} - H_{95\%}$	1820
La pente utile	$PU = (DU/L) * 100$	8.54
L'indice de pente globale	$I_g = D/L$	14.1
Dénivelée spécifique	$DS = PU \sqrt{A}$	430
Indice de soulèvement Rt	$R_t = H_{moy} / A$	0.7

Cette topographie contrastée entre l'amont montagneux, du moyen Atlas, et l'aval plat, du bassin de Guercif, joue un rôle déterminant dans la distribution des pentes et par la suite de l'énergie de relief. Le dénivelé spécifique est de 430, la pente moyenne et la pente globale du bassin versant d'environ 14 m/km, ce qui montrent pratiquement un relief fort. Cette énergie forte agit sur la réponse hydrologique lors d'une averse.

#### 5 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique se définit comme étant l'ensemble des drains naturels permanents ou temporaires qui assurent le drainage superficiel dans le bassin versant (Taous, 2005). Il est sans doute l'un des caractéristiques les plus utilisées dans l'explication de la réponse hydrologique d'un bassin versant. L'évolution du réseau hydrographique est expliquée généralement par les facteurs suivants :

- Lithologie : la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique ;

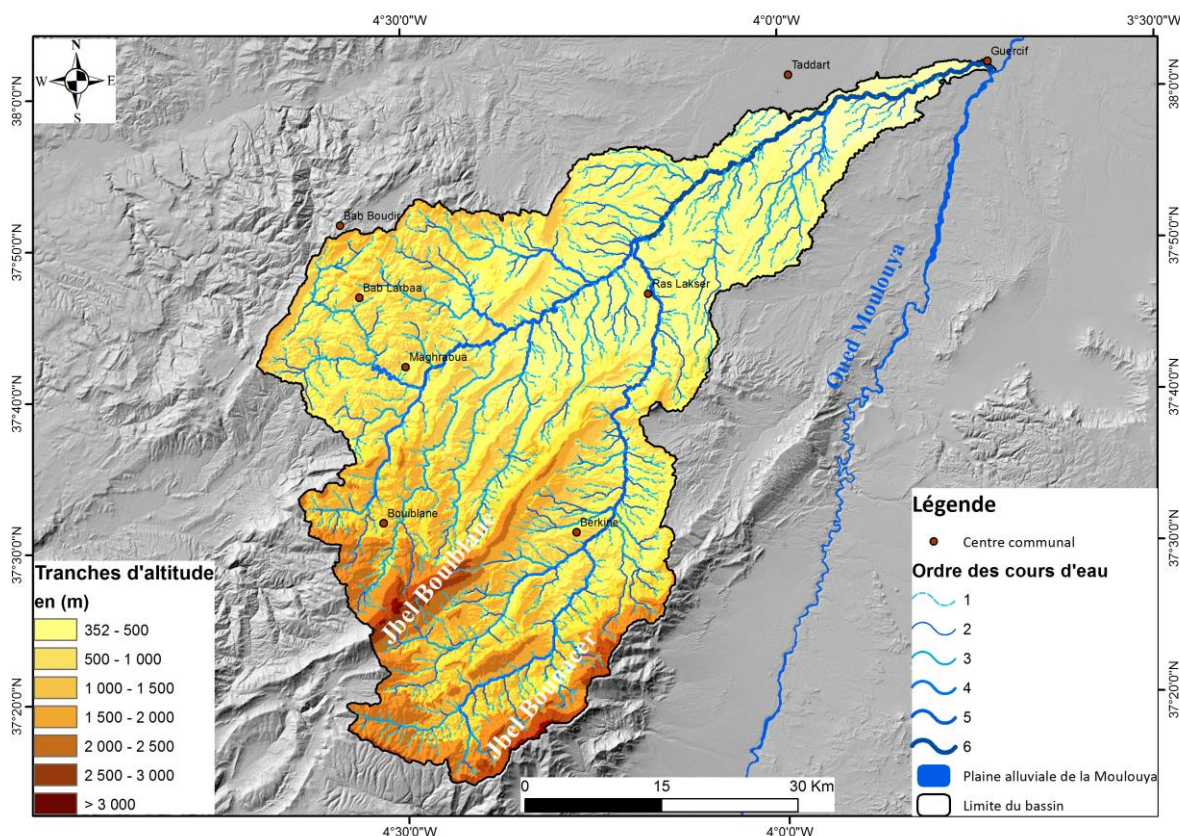
- Climat : la densité et la forme du réseau hydrographique varient fortement entre les régions humides et les régions arides et désertiques ;
- Pente et l'énergie de relief : ce facteur est déterminant si les cours d'eau sont en phase érosive ou de dépôt ;
- Géologie : les cours d'eau suivent pratiquement les accidents qui ont affecté les formations géologiques et se modifient avec la dynamique de la tectonique.

Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Melloulou est extrait des cartes topographiques 1/100000 qui couvrent le territoire et à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de 30 m de résolution. Le traitement de ces données a été établi sur le logiciel ArcGIS de « ESRI ».

### **5.1 Classification des talwegs.**

La classification du réseau hydrographique et sa hiérarchisation ont une importance majeure pour étudier et analyser le degré d'acheminement de ce dernier. Pour cet objectif, plusieurs classifications ont été élaborées. La méthode de Strahler (1957) est la plus utilisée dans la bibliographie hydrologique. Cette méthode considère que tout drain n'ayant pas d'affluent se voit attribuer la valeur X1 (Lasri, 2015). Puis, un drain d'ordre X2 est issu de la confluence de deux drains d'ordre X1, ainsi de suite. L'ordre de Strahler pour un bassin versant est l'ordre du drain principal à l'exutoire.

En utilisant les cartes topographiques 1/100000 et le MNT à 30 mètres de résolution, on a pu digitaliser et extraire 1132 drains sur la totalité du bassin versant. Ce nombre est divisé en 6 ordres, 904 drains d'ordre 1, 183 d'ordre 2, 33 d'ordre 3, 9 d'ordre 4, 2 d'ordre 5 et un seul d'ordre 6 (Fig. 11 et Tab. 10). La majeure partie du réseau hydrographique est constituée de drains préliminaires qui couvrent environ 80% du territoire. Presque tous les cours d'eau d'ordre  $n$  rejoignent ceux d'ordre  $n+1$ . Ce résultat est un bon indicateur sur la concentration de l'écoulement lors d'une averse. La longueur totale des cours d'eau est estimée de 3462 km. Le réseau hydrographique est faiblement développé par rapport à la surface, à l'énergie de relief en amont et au terrain accidenté dans le bassin. Sa densité diminue du Sud vers le Nord, à cause de l'amortissement de la pente, et par la suite de la diminution de l'énergie de creusement et de drainage (Tab. 10).



**Figure 11 : Carte du réseau hydrographique hiérarchisée selon la méthode de Straler (1957)**

**Tableau 10 : Ordination du réseau hydrographique des cinq sous-bassins versants**

Ordre	Nombre	% du nombre des drains	Longueur (m)	Longueur (Km)	% des longueurs
1	904	79.86	1581323	1581.323	45.67
2	183	16.17	1004947	1004.947	29.03
3	33	2.92	454251	454.251	13.12
4	9	0.80	164890	164.89	4.76
5	2	0.18	138979	138.979	4.01
6	1	0.09	117872	117.872	3.40
<b>Total</b>	<b>1132</b>	<b>100</b>	<b>3462262</b>	<b>3462</b>	<b>100</b>

Pour bien détailler l'organisation du réseau hydrographique dans le bassin versant de l'oued Melloulou et dégager l'influence de ce dernier sur la réponse hydrologique, plusieurs indices ont été utilisés, nommés indices de réseau ou indices hydro-morphométriques (Duvall et al., 2004 et Lasri, 2015).

## 5.2 Densité de drainage

L'indice de caractérisation du réseau hydrographique le plus fréquent dans la littérature hydrologique est celui de la densité de drainage (Dd). Il est la mesure de la longueur totale des segments de flux, de tous les ordres, divisée par l'unité de surface (Charlton, 2008). Cet indice est influencé par plusieurs facteurs qui contrôlent la longueur caractéristique du cours d'eau, comme la perméabilité de la formation rocheuse, le climat, la végétation, etc. Langbein (1947) a reconnu l'importance de la (Dd) comme facteur déterminant du temps de parcours de l'eau dans le bassin et suggère qu'il varie entre 0,55 et 2,09 km / km<sup>2</sup> dans les régions humides. En général, une faible valeur de Dd est observée dans les régions reposant sur un matériau perméable très résistant avec une forte couverture végétale et un faible relief. Une densité de drainage élevée est observée également dans les régions de matériaux de sous-surface faibles et imperméables, de végétation clairsemée et de relief montagneux.

$$Dd = \sum_{i=1}^n Li / A$$

Avec : *Li* : est la longueur des drains (km) et *A* : est la surface totale du bassin versant (km<sup>2</sup>)

La valeur (Dd), calculée pour le bassin versant de l'oued Melloulou, est de 1.38 Km/Km<sup>2</sup>. Ce résultat indique que, généralement, le réseau hydrographique est dense et développé.

Le chiffre théorique obtenu n'envisage pas nécessairement la réalité, vu la grande superficie du terrain et la diversification de la couverture lithologique, végétative, ainsi que la grande variabilité spatiale des précipitations.

## 5.3 Fréquence de flux

La fréquence de flux ou La densité hydrographique est le nombre total de segments de flux de tous les ordres par unité de surface (Horton, 1932).

$$\sum_{i=1}^n ni / A$$

Avec, *ni* : le nombre total des drains et *A* : la surface totale du bassin versant (km<sup>2</sup>).

La densité hydrographique (la fréquence de flux) est une moyenne explicative de la perméabilité du terrain (Benzougagh et al., 2016). Le bassin versant de l'oued Melloulou présente une faible valeur de cet indice. Elle est de 0.44, c'est à dire une partie importante des précipitations que reçoit le bassin s'infiltrer vers les réservoirs sous terrains. Cependant, l'écoulement superficiel est faible. La carte lithologique nous informe que plus de 70% du

bassin est couvert par un substratum carbonaté perméable en amont, et par les calcaires lacustres du quaternaire en aval peu perméable.

#### **5.4 Rapport de bifurcation (Rb)**

Nommé également **Rapport de confluence (Rc)**, c'est le rapport entre le nombre de flux d'ordre donné et le nombre de flux d'ordre supérieur (Schumm, 1956). Horton (1945) considérait le rapport de bifurcation (**Rb**) comme un indice de relief et de dissections. Strahler (1957) a démontré que **Rb** ne présente qu'une faible variation selon les régions et les environnements, sauf dans les cas où un contrôle géologique puissant domine. Les valeurs élevées de **Rb** indiquent un fort contrôle structural sur le réseau de drainage alors que la valeur faible indique que le bassin est moins affecté par les perturbations structurales (Benzougagh et al., 2016).

$$\mathbf{Rb} = \frac{\mathbf{Nn}}{\mathbf{N(n+1)}}$$

Avec **N** : Nombre de talwegs d'ordre n et **N (n+1)** : Nombre de talwegs d'ordre n+1

La valeur moyenne estimée du rapport de confluence pour le bassin versant de l'oued Melloulou est de 4.13. Elle montre un impact distingué de l'effet structural sur la genèse et l'évolution du réseau hydrographique.

#### **5.5 Longueur moyenne des cours d'eau (Lm)**

La longueur moyenne d'un cours d'eau dans un bassin versant est une propriété dimensionnelle qui révèle la taille caractéristique des composants du réseau de drainage et les surfaces du bassin qui le contribue (Strahler, 1964). La longueur moyenne de flux (**Lm**) se calcule en divisant la longueur totale de flux d'ordre i par le nombre de flux du même ordre.

#### **5.6 Texture de drainage**

C'est le nombre total de segments, de tous les ordres, drainant un bassin versant divisé par le périmètre du même bassin (Horton, 1945). La texture de drainage du bassin est un paramètre très important qui nous fournit une idée sur la géomorphologie du terrain. Elle indique la lithologie souterraine et la capacité d'infiltration. Smith (1950) a classé la texture de drainage en cinq textures différentes, à savoir très grossière (<2), grossière (2-4), modérée (4-6), fine (6-8) et très fine (> 8). Selon cette classification, le bassin versant de

l'oued Melloulou est caractérisé par une texture de drainage modérée, avec une perméabilité importante. Cette dernière égale à 4.6.

### **5.7 Nombre d'infiltration (si)**

Le nombre d'infiltration d'un bassin de drainage est le produit de la densité de drainage et de la fréquence des flux d'un bassin. C'est le nombre en vertu duquel une idée concernant les caractéristiques d'infiltration du bassin sont obtenues. La valeur la plus élevée indique une infiltration faible et un ruissellement élevé (Waqas et al., 2017).

Le nombre d'infiltration estimé pour le bassin versant de l'oued Melloulou est de 2.2. Cela indique une infiltration forte et un déséquilibre entre le taux des eaux infiltrées est ceux écoulés dans les cours d'eau.

### **5.8 Rapport des longueurs (RI)**

Il est défini comme le rapport entre la longueur moyenne des thalwegs d'ordre (n+1) par celui des thalwegs d'ordre (n). C'est un indicateur sur l'homogénéité physique d'un bassin versant (Mayomi et al., 2018).

$$RI = \frac{L(n+1)}{Ln}$$

Avec  $Ln$  : la longueur moyenne des talwegs d'ordre n ;  $L(n+1)$  est la longueur moyenne des talwegs d'ordre n+1

Pour un bassin homogène et bien drainé, le rapport de longueur (RL), calculé pour chaque ordre, sera proche de celui sous-jacent. L'inverse est le cas pour un bassin versant qui a un réseau hydrographique moins développé (Benzougagh et al., 2016).

### **5.9 Résultats des indices du réseau hydrographique**

Le tableau ci-dessous montre des variations distinguées du rapport de longueur au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou selon l'ordre du réseau. Ceci est dû principalement à des variations de pente, de topographie, de lithologie des espaces drainés, ainsi qu'à la variation du degré de couverture de la végétation.

**Tableau 11 : Résultats des indices de réseau hydrographique dans le bassin.**

Ordre	Nombre	Fréquence des biefs (Fb)	Texture de drainage (Td)	Rapport de Confluence (Rc)	Rapport de Longueur Moyen biefs (RI)	Longueur Moyenne des Biefs (m)
1	904	<b>0.35</b>	<b>0.48</b>			<b>1440.2</b>
2	183	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>	<b>3.02</b>	<b>1.92</b>	<b>2768.4</b>
3	33	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>4.13</b>	<b>1.86</b>	<b>5161.9</b>
4	9	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>6.29</b>	<b>2.28</b>	<b>11777.9</b>
5	2	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>1.75</b>	<b>1.48</b>	<b>17372.4</b>
6	1	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>2.67</b>	<b>2.26</b>	<b>39290.7</b>
Total général	<b>1132</b>	<b>0.44</b>	<b>0.60</b>			

## 6 Profils en long

Le profil en long, profil longitudinal, est une représentation graphique montrant la variation de l'altitude du lit d'un cours d'eau en fonction de la distance à l'émissaire (Taous, 2005). L'étude du profil en long d'un cours d'eau actuel renseigne sur son évolution morphodynamique (Larue, 2014 ; Duvall et al., 2004). Selon Larue (2014), la courbe du profil tend à adopter la forme concave en amont, la plus apte à permettre le transport de la charge solide et l'incision du lit fluvial. Cette forme varie d'un cours d'eau à un autre selon la lithologie et la tectonique qui influencent fortement l'érosion verticale (Holbrook et Schumm, 1999). Cette présentation graphique est un outil efficace pour définir la répartition des pentes le long d'un cours d'eau. Ces pentes conditionnent la vitesse d'écoulement et par conséquent le temps de concentration (Qadem, 2015).

Afin de visualiser les variations de pente et leurs principales ruptures, un indice de concavité (IC) de Langbein (1964) a été calculé pour chaque cours d'eau.

$$IC = 2A/H,$$

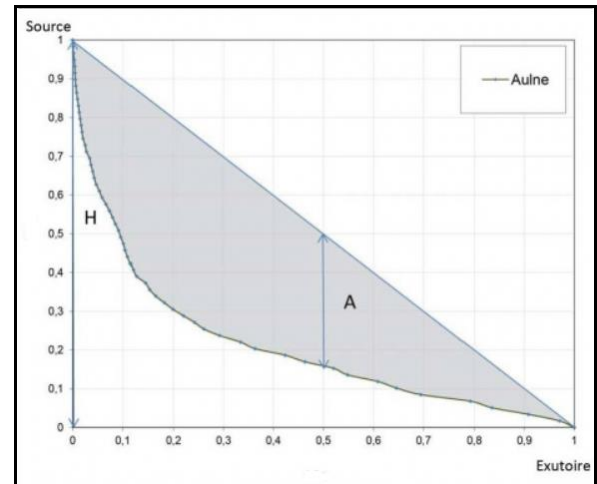
Avec **A** = différence d'altitude entre le profil à mi-parcours et une ligne droite joignant les deux extrémités du profil (le point de source et l'exutoire), **H** = dénivellation entre la source et l'exutoire du drain (Fig. 11).

Le profil tend à être rectiligne quand la valeur de (IC) est proche de 0 ; à l'inverse, la concavité devient très forte quand la valeur s'approche de 1.

Les profils longitudinaux de l'oued Melloulou et ces principaux affluents ont été construits à base d'un MNT (Modèle numérique de terrain). Cette source de données est suffisante pour visualiser la variation de la pente au niveau des principaux cours d'eau.

### 6.1 Profil de l'Oued Melloulou

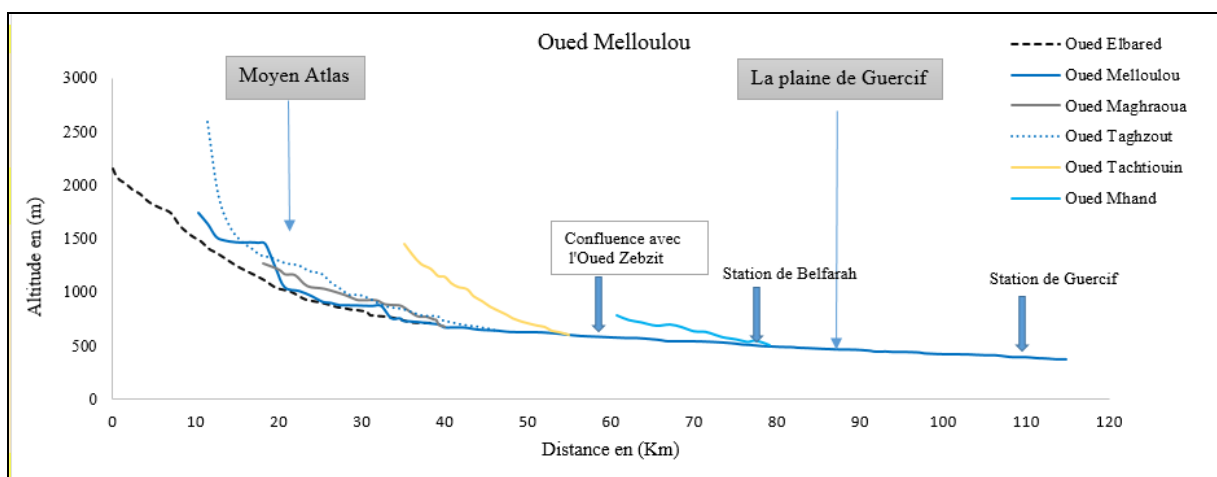
D'après les profils longitudinaux de l'oued Melloulou et de ses affluents, il ressort que le système de pente dépend de la topographie du terrain. En effet, les pentes fortes sont observées au niveau de la partie montagneuse du Moyen Atlas. La zone sur laquelle les oueds drainent des formations lithologiques dures. En revanche, un amortissement de la pente a été constaté au niveau la plaine de Guercif (Fig. 13).



**Figure 12 : Indice de concavité de W.B. LANGBEIN (1964) :  $IC = 2A/H$ . cité par Larue (2014)**

Les pentes moyennes des cours d'eau oscillent entre 15 et 55 m/Km. Les valeurs les plus élevées ont été remarquées au niveau des oueds qui drainent le Moyen Atlas (55.3 m/Km pour l'oued Taghzout).

A l'instar de la variation de la pente des oueds, la concavité diminue également de l'amont vers l'aval, où la forme des cours d'eau devenue plus ou moins rectiligne. Les valeurs de l'indice de concavité varient de 0.14 pour l'oued Mhand, constituant le cours d'eau le plus rectiligne, et 0.57 pour l'oued Melloulou, surtout dans sa partie Moyenne atlasique, qui est considérée comme le cours d'eau le plus concave (Tab. 12).



**Figure 13 : Profils en long du cours d'eau principal et des affluents de la rive gauche**

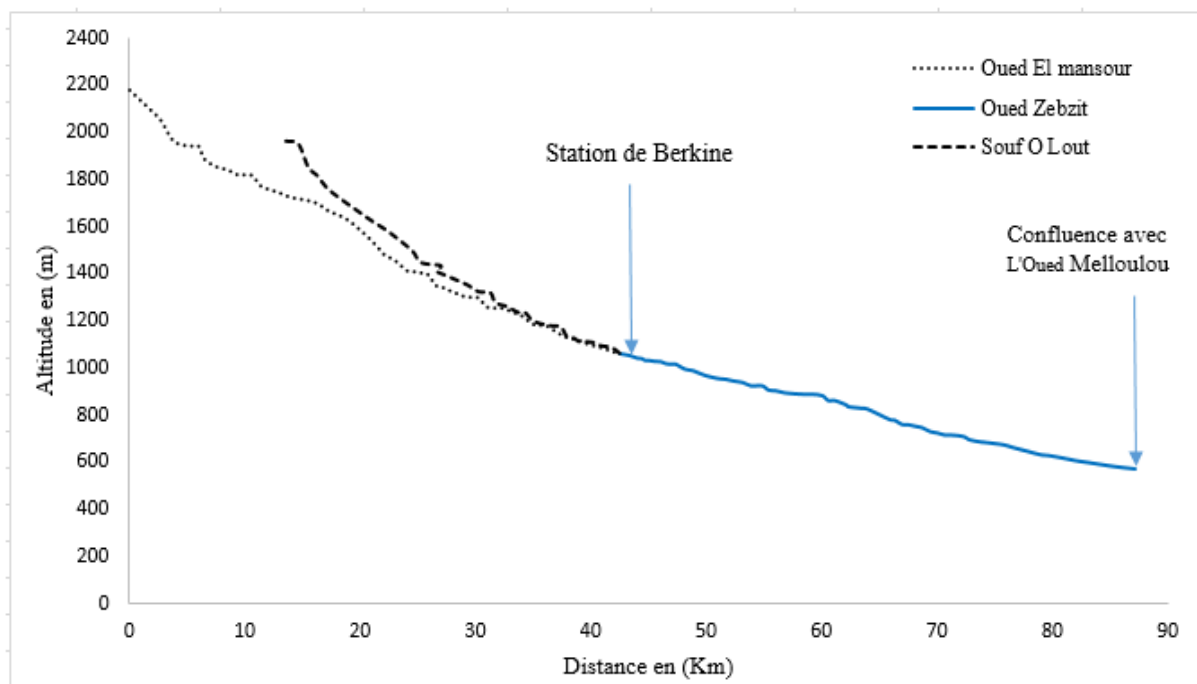
**Tableau 12 : Indices des profils longitudinaux du cours d'eau principal et des affluents de la rive gauche**

	Dénivellation maximale (m)	Distance (Km)	Pente (m/Km)	Indice de concavité
Oued El Bared	1449	38.7	37.44	0.44
Oued Taghzout	1947	35.2	55.33	0.56
Oued Melloulou	1394	104.6	13.33	0.57
Oued Tachtouin	839	20.0	41.95	0.43
Oued Maghraoua	596	22.0	27.09	0.17
Oued Mhand	279	18.5	15.08	0.14

## 6.2 Profil de l'oued Zebzit et ses affluents

Le profil longitudinal de l'oued Zebzit et ses affluents montrent une pente assez forte et régulière le long des cours d'eau. Cette dernière peut atteindre 30 m/Km, notamment avant de rejoindre la station hydrométéorologique de Berkine. Après ce point, la pente s'affaiblit lentement jusqu'à la confluence de l'oued Zebzit avec l'oued Melloulou

Les valeurs estimées de l'indice de concavité sont faibles, ce qui indique une forme plus ou moins rectiligne de ces oueds.



**Figure 14 : Profils en long de l'oued Zebzit et de ses affluents principaux**

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**Tableau 13 : Indices des profils longitudinaux de l'oued Zebzit et de ses affluents principaux**

	Dénivellation maximale (m)	Distance (Km)	Pente (m/Km)	Indice de concavité
L'oued Zebzit	491	45	10.91	0.08
L'oued El Mansour	1157	42.5	27.22	0.26
Souf O Lout	901	29	31.07	0.20

**7 Estimation des indices hydromorphométriques pour les 11 sous bassins**

A l'instar des indices de forme et de ceux de l'énergie de relief calculés pour notre bassin versant, nous avons analysé en détail le réseau hydrographique des 11 sous bassins afin de mieux comprendre la contribution de leurs caractéristiques hydromorphométriques dans la réponse hydrologique. Par la suite, nous avons calculé les indices de réseau pour chaque sous bassin.

Cette analyse montre une variation, plus ou moins importante, des résultats d'un sous bassin à un autre selon la couverture lithologique, la structure géologique, le couvert végétal et la topographie du terrain.

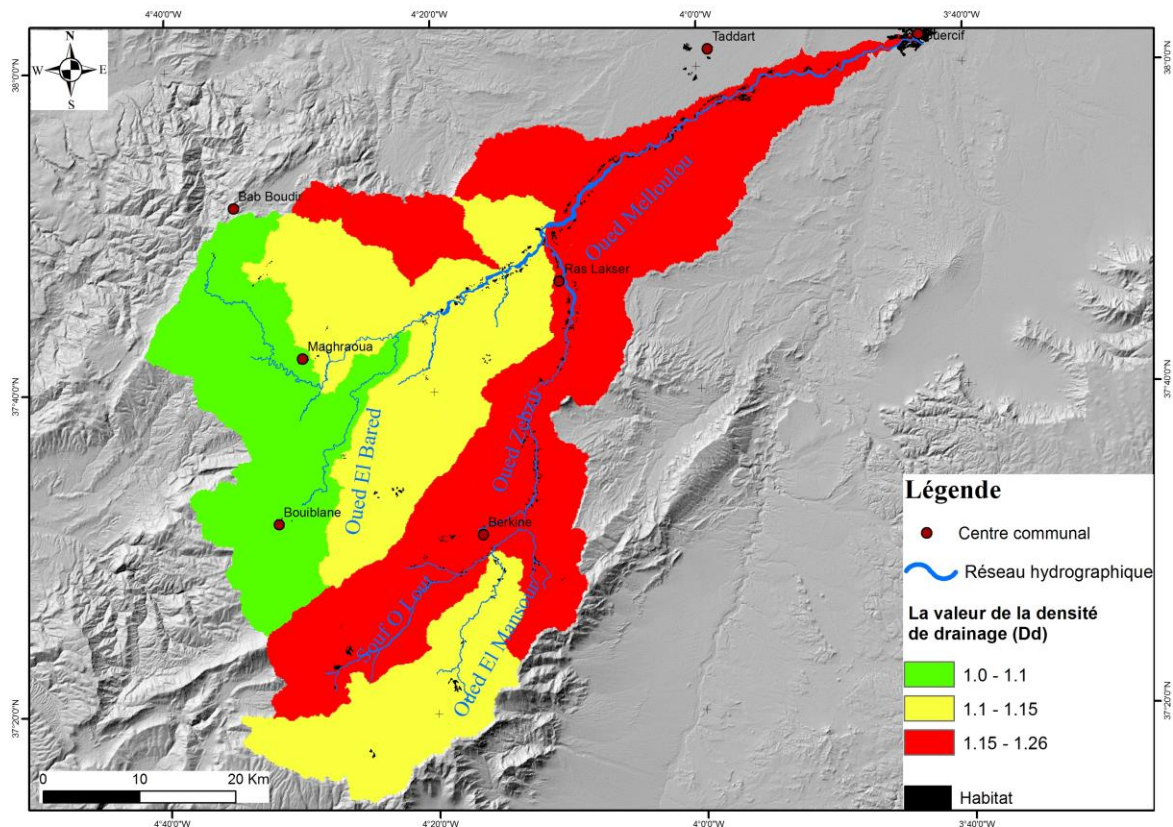
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau 14.

**Tableau 14 : Résultats des indices du réseau hydrographique pour les 11 sous bassins**

	SBS 1	SBS 2	SBS 3	SBS 4	SBS 5	SBS 6	SBS 7	SBS 8	SBS 9	SBS 10	SBS 11
Densité de drainage	1.22	1.14	1.20	1.27	1.14	1.07	1.10	1.11	1.01	1.18	1.14
Nombre de flux	299	217	88	292	101	165	145	107	130	211	258
Longueur totale	551	330	124	476	134	220	227	167	153	269	343
Texture de drainage	0.8	0.85	1.03	0.98	0.97	0.85	0.78	0.79	0.87	1.08	0.98
Rapport de Confluence	4	3.6	4.22	3.81	4.48	3.68	4.86	5.1	3.16	3.8	3.77
Rapport de Longueur Moyen biefs	2.37	1.76	2.64	3.13	2.8	2.07	3.19	3.4	2.41	1.98	3.8
Nombre d'infiltration	1.85	1.52	1.41	1.64	1.33	1.34	1.57	1.56	1.17	1.28	1.33
Fréquence de flux	0.66	0.75	0.85	0.77	0.86	0.8	0.7	0.71	0.86	0.92	0.86

Les valeurs de densité de drainage, calculées pour nos sous bassins varient entre 1 et 1.26. Les faibles valeurs de cet indice indiquent une bonne couverture végétale, ainsi qu'un substratum tendre et perméable. C'est le cas de la partie amont de notre bassin, notamment le sous bassin de Maghraoua qui chevauche sur une zone à forêts denses et une lithologie calcaire et dolomitique perméable (Fig. 14). Tandis que les valeurs élevées de densité de drainage sont observées au niveau des sous bassins de l'aval. Cette partie est caractérisée par une faible perméabilité, exposée aux précipitations violentes avec des sols nus (Fig. 15). Selon la figure 15, les valeurs de la fréquence de flux présentent également une variation

entre les sous bassins de l'amont et ceux de l'aval. Elles varient entre 0.66 et 0.92. Les faibles fréquences observées en aval sont dues essentiellement à la topographie plate et aux faibles taux de pluie tombées. Tandis qu'en amont, et malgré la forte perméabilité des roches, l'énergie de relief et les fortes précipitations favorisent le développement d'un réseau hydrographique dense.



**Figure 15 : Valeurs de densité de drainage calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins**

L'impact de la tectonique et du contrôle structural sur l'évolution du réseau hydrographique est peu important. En effet, la spatialisation de l'indice de confluence ou l'indice de bifurcation indique des valeurs oscillantes entre 3.16 et 5.1 (Fig. 16). La zone la plus affectée par ce paramètre est celle qui contient l'accident Nord Moyen Atlasique à l'ouest de Jbel Bouiblanc avec un  $R_b = 5.1$ . Cet impact est très faible au niveau de la plaine de Guercif.

La texture de drainage des sous-bassins versant d'oued Melloulou varie de 1 à 2.6. Seulement deux catégories de texture ont été constatées dans notre le bassin :

Texture du drainage très grossier pour les : SBS 01 (1.7), SBS 02 (1.47), SBS 03 (1.33), SBS 05 (1.7), SBS 07 (1.8), SBS 08 (1.1) et SBS 09 (1.68) ;

Texture du drainage grossier pour les : SBS 04 (2.01), SBS 06 (2.06), SBS 10 (2.6) et SBS 11 (2.52).

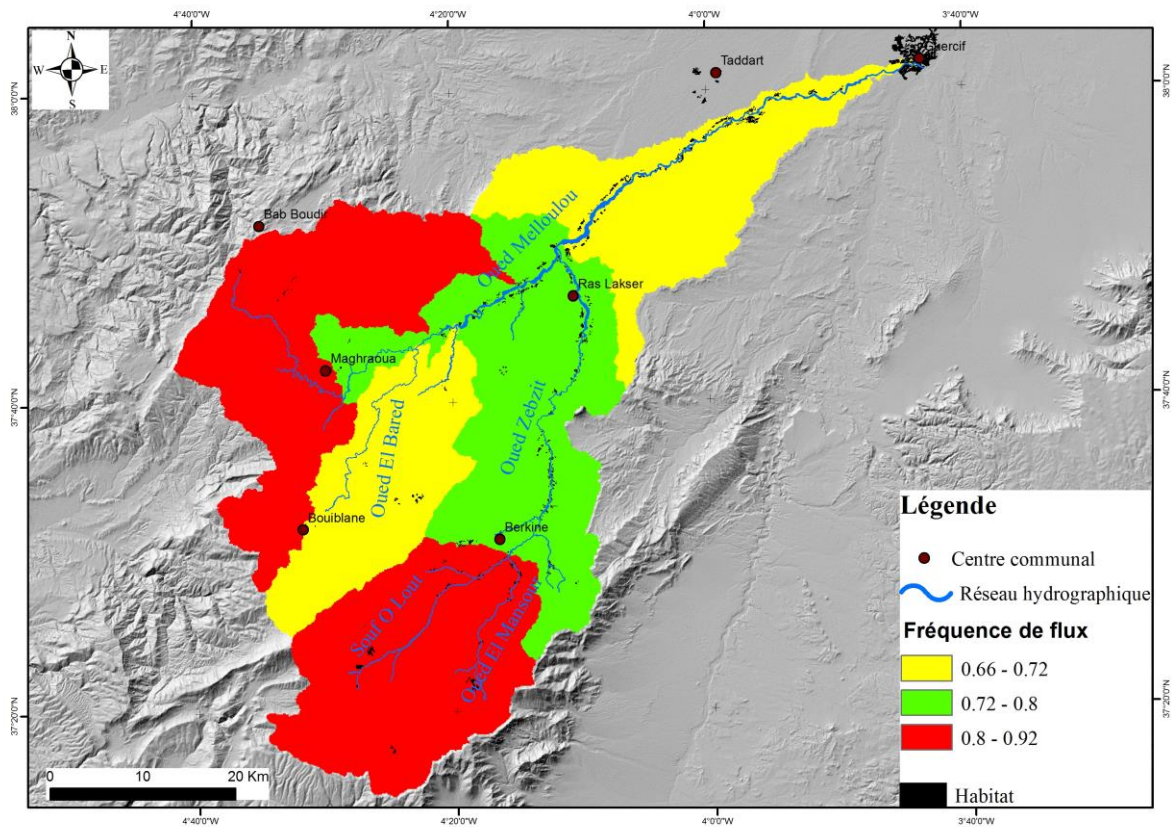


Figure 16 : Valeurs de la fréquence de flux calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins

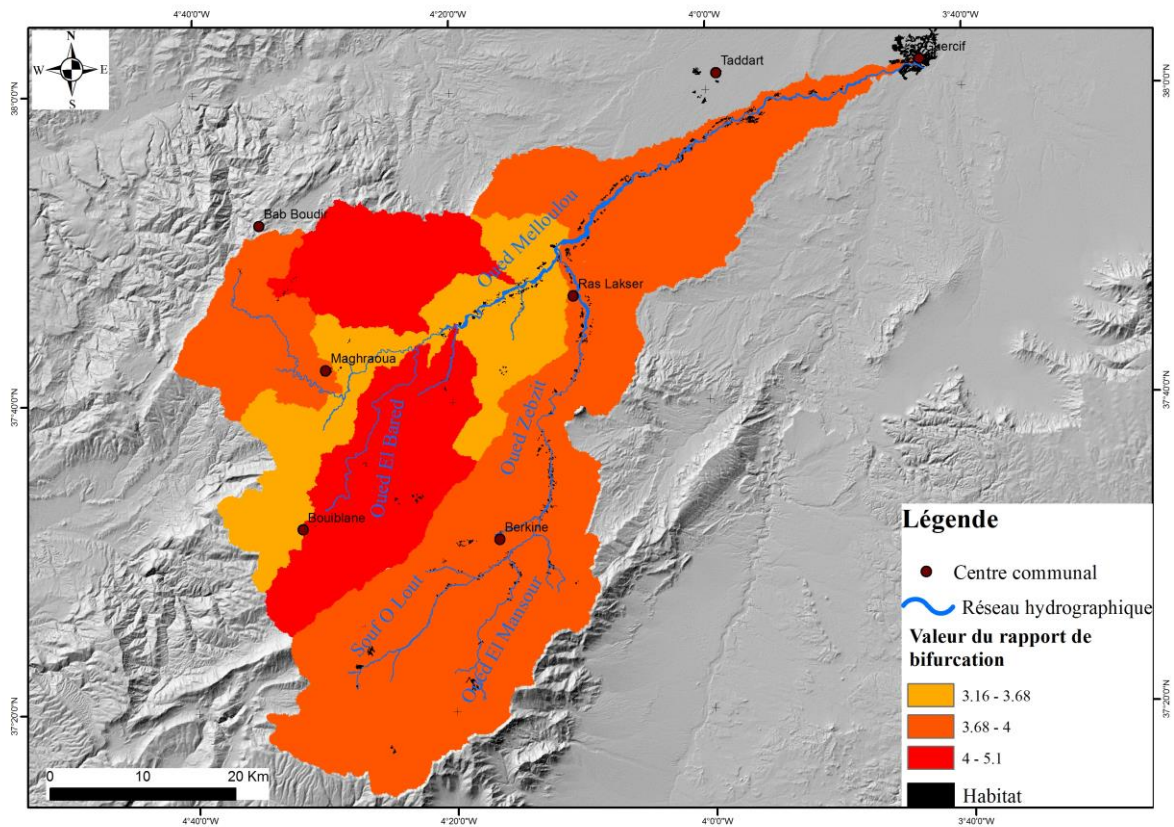


Figure 17 : Valeurs du rapport de bifurcation, calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins

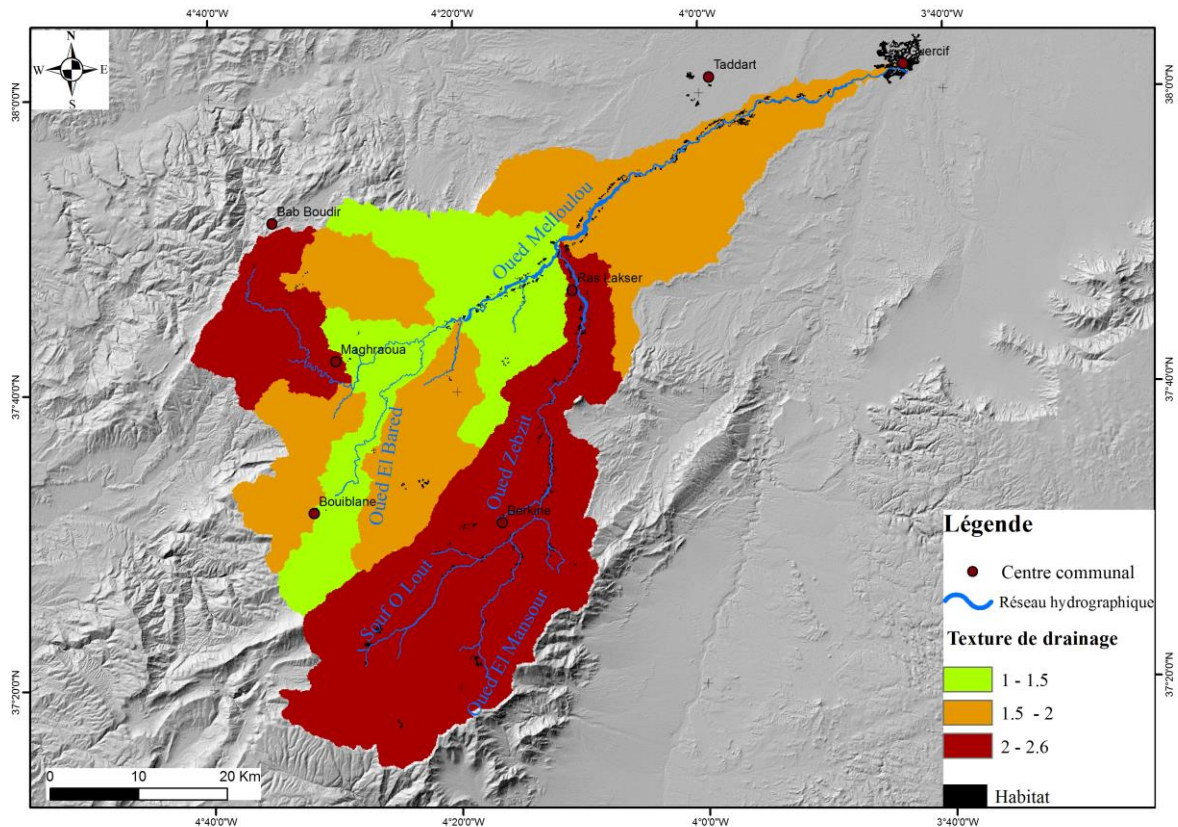
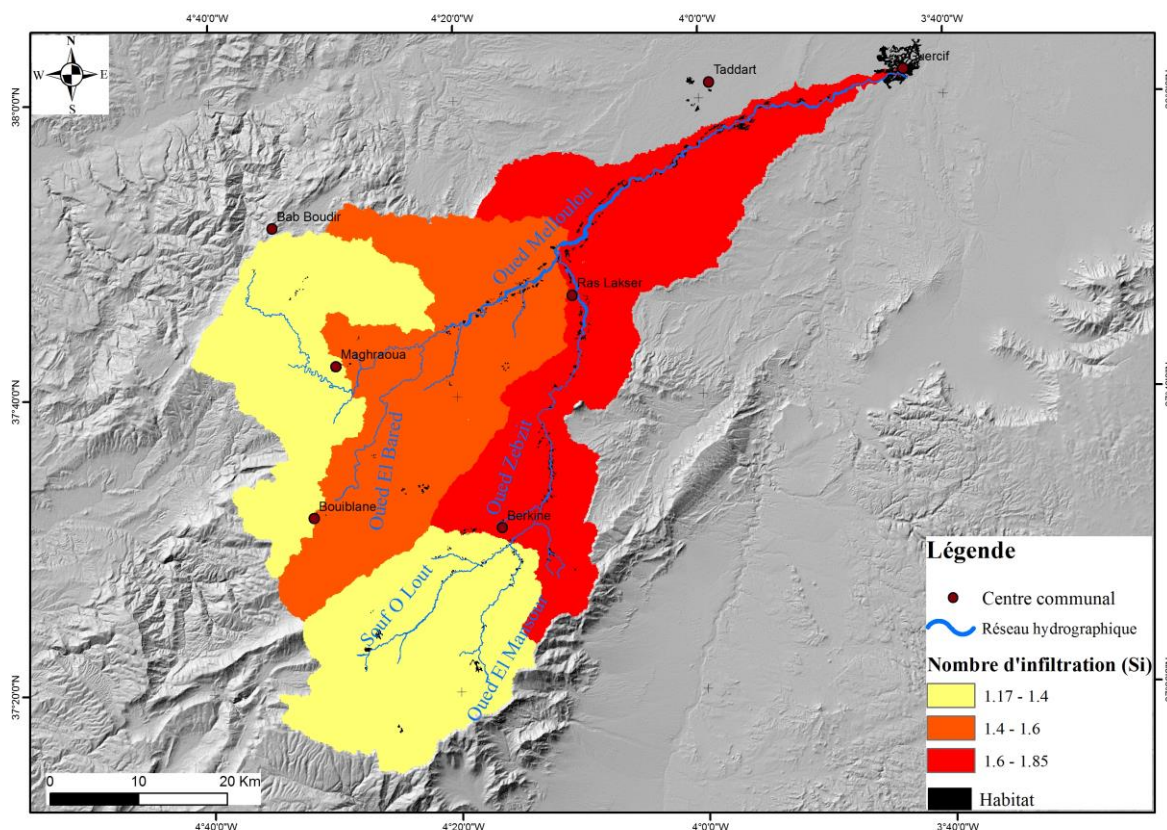


Figure 18 : Valeurs de la texture de drainage, calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins

Rappelant que la valeur d'infiltration a une relation inverse avec le ruissellement. C'est-à-dire, la valeur du nombre d'infiltration ( $S_i$ ) la plus élevée indique une infiltration faible et un ruissellement élevé. Au niveau des sous bassins traités, les valeurs de ( $S_i$ ) oscillent entre 1.17 et 1.85, ce qui montre déjà une infiltration importante (Fig. 17).

Les valeurs du nombre d'infiltration les plus faibles ont été observées au niveau de la partie moyenne atlasique. C'est la zone où la couverture lithologique est caractérisée par un grand réseau de fissurations. Ce caractère provoque une infiltration élevée des eaux de pluie et amortit, par la suite, la réponse hydrologique du bassin versant.

Les valeurs élevées de cet indice ont été signalées dans les sous bassins couverts par un substratum peu perméable et imperméable ; c'est le cas des marnes bleues de miocène et des formations récentes en aval (Fig. 17).



**Figure 19 : Valeurs de l'indice de nombre d'infiltration, calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins**

Les valeurs obtenues des rapports de longueurs des sous bassins versants indiquent un réseau hydrographique et un drainage peu développé. En effet, une grande dispersion des résultats (RI) d'un ordre à un autre dans le même sous bassin a été détectée (Tab. 15).

**Tableau 15 : Résultats des rapports de longueurs des sous bassins versants**

Ordre du cours d'eau	SBS 1	SBS 2	SBS 3	SBS 4	SBS 5	SBS 6	SBS 7	SBS 8	SBS 9	SBS 10	SBS 11
1											
2	2.31	1.74	3.23	1.48	1.59	2.03	1.22	1.75	1.93	2.06	1.65
3	1.89	2.09	1.59	2.10	5.80	1.68	6.35	4.86	1.67	1.90	2.09
4	1.91	2.42	3.11	1.39	1.00	3.76	1.99	3.51	1.47	2.90	1.16
5	3.35	0.79		7.56		0.80			4.56	1.06	7.45

## 8 Contexte structural et lithologique du bassin versant de l'oued Melloulou

Les caractéristiques géologiques ont une influence directe sur la circulation de l'eau pluviale dans une région donnée. Elles déterminent la nature de l'écoulement : un écoulement superficiel rapide dans le cas des formations imperméables, une infiltration et un stockage de l'eau, un écoulement souterrain, dans le cas de formations perméables. La connaissance de la géologie d'un bassin versant s'avère donc indispensable pour cerner les potentialités

des ressources en eaux et l'impact de ce facteur sur le comportement hydrologique du bassin versant de l'oued Melloulou.

Au niveau de notre zone d'étude de nombreuses études ont été réalisées sur la géologie, et notamment sur la partie sud du bassin versant de l'oued Melloulou. Dans ce contexte, on peut citer, à titre d'exemple Sabaoui et Villard (1987) et Saadi (1996). Mouhdi (1993) a également détaillé la géologie du Melloulou. Notre contribution dans ce sens est un rappel sur l'aspect géologique influant le fonctionnement hydrologique.

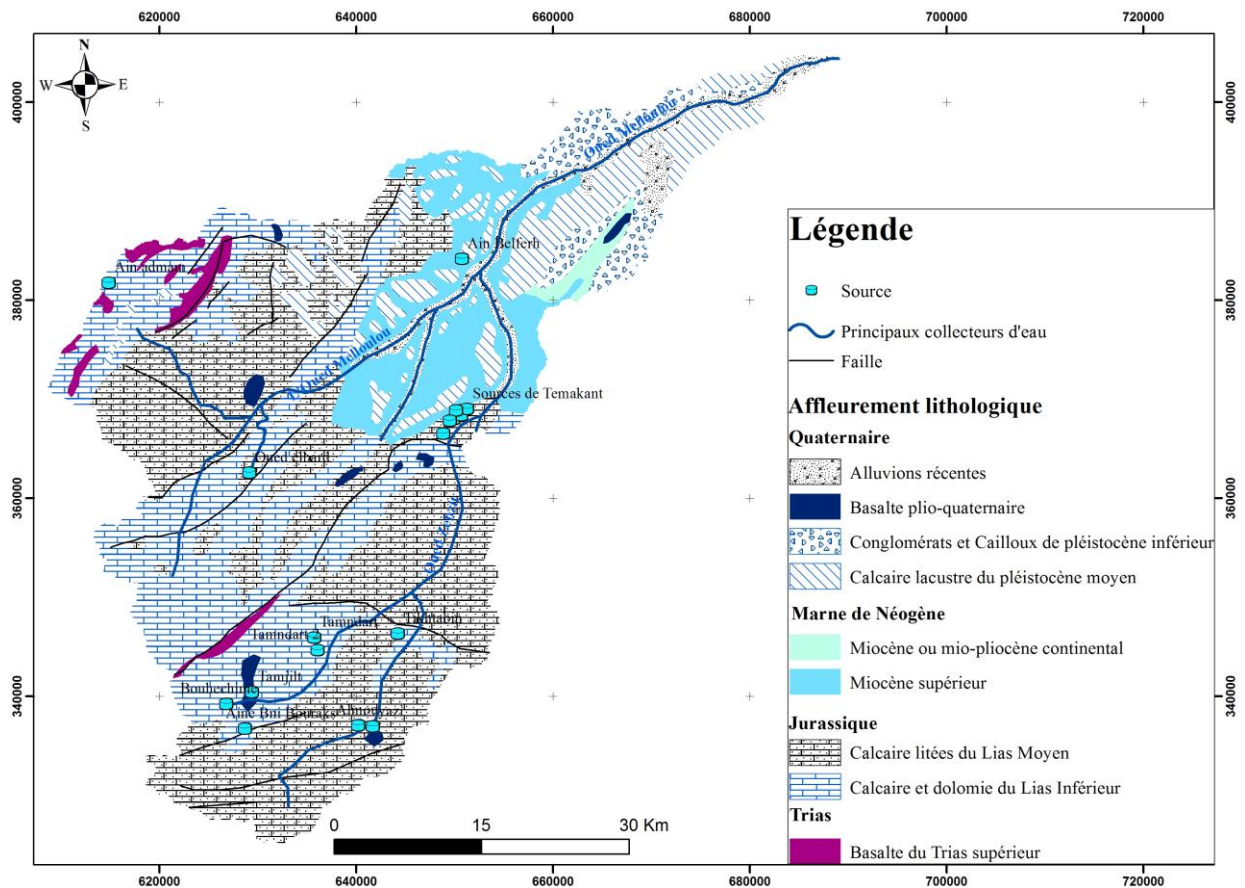
Le bassin versant de l'oued Melloulou chevauche sur deux unités structurales contrastées :

- Le Moyen Atlas septentrional : il couvre la zone sud et sud-ouest et il est caractérisé par des affleurements d'âge jurassique et des tâches du permo-trias. Son histoire tectonique lui a donné une structure très complexe. Pourtant, on distingue l'existence de quatre rides anticlinales parallèles qui se succèdent du NW au SE et qui sont séparées par des zones synclinales.
- Le bassin de Guercif au nord : c'est une dépression de remplissage mio-plio-quadernaire (miocène, pliocène et quadernaire) surmontant les formations jurassiques, calcaires et dolomitiques (Mouhdi, 1993).

### **8.1 Perméabilité du terrain**

Le substratum lithologique est l'un des principaux facteurs contrôlant la capacité du stockage des ressources en eaux souterraines. Ainsi, ce facteur influence l'écoulement fortement superficiel, intervient sur la vitesse de montée des crues, sur leur volume et le soutien apporté, éventuellement, au débit d'étiage par les nappes souterraines quand elles existent (Taous, 2005). En effet, suite à un même évènement pluvieux, la réponse hydrologique sera plus rapide et plus violente dans un bassin versant à substrat imperméable par rapport à un bassin perméable (Lasri, 2015).

Le bassin versant de l'oued Melloulou présente une mauvaise couverture en cartes géologique à petite échelle. Pour cette raison, on s'est basé sur la carte géologique du Nord Maroc 1/500000 pour déterminer la répartition des formations lithologiques et leur degré de perméabilité.



**Figure 20 : Carte lithologique du bassin versant de l’oued Melloulou (extraite de la carte géologique du Nord Maroc ; 1/500000.**

La lecture de la carte lithologique (Fig. 20) nous permet d’extraire les formations suivantes :

- **Quaternaire** : Couvre, environ, 20% de la superficie totale du bassin versant de l’oued Melloulou. Il est dominé par des alluvions récentes, des conglomérats et cailloux, des basaltes quaternaires et des calcaires lacustres du pléistocène moyen. Ces dernières formations affleurent surtout dans la partie nord-est du bassin versant.

- **Néogène (miocène)** : Correspond à une période transgressive dont le Moyen Atlas plissé resté émergé. Il a été l'objet d'une érosion intensive. Le produit de cette érosion s'est accumulé dans le bassin sédimentaire de Guercif durant le Tortonien (Mouhdi, 1993). Les marnes bleues sont la formation représentative de cet âge au sud du bassin de Guercif. Le tout a été couvert par des dépôts continentaux pendant le "Pontien" et le début du Pliocène. L'ensemble de ces formations couvre environ 10% de la surface du bassin-versant (Tab. 16).

- **Jurassique inférieur et moyen** : occupe, environ, 60% du bassin, dominé par les formations calcaires et dolomies du lias inférieur et calcaires lités du lias moyen. Ces formations carbonatées couvrent la majorité du Moyen Atlas. Leur épaisseur varie de 50 à

100 m. Le nombre d'accidents et de fissures fait de cette dernière la partie la plus perméable du bassin.

• **Trias** : présenté par des formations basaltiques, il apparaît, notamment, au niveau des accidents majeurs et profonds du Moyen Atlas Plissé. Ces coulées sont très fissurées et encadrées par des argilites et siltites rouges du trias supérieur. Elles couvrent environ 2% de la superficie totale du bassin.

**Tableau 16 : Superficie occupée par chaque formation lithologique dans le bassin versant**

Formation lithologique	Superficie en Km <sup>2</sup>	Superficie en %
Calcaires lacustres du pléistocène moyen	337	12.41
Conglomérats et cailloux	23	0.85
Basalte triasique	47	1.73
Alluvions récentes	203	7.47
Basaltes quaternaire	28	1.03
Calcaire et dolomie du lias inferieur	755	27.80
Calcaires lités du lias moyen	1015	38.22
Marnes bleues du Miocène	285	10.49
		100

## **9 Couverture végétale du bassin versant de l'oued Melloulou**

Depuis quelques années, le problème de l'impact des modifications de l'occupation des sols sur le fonctionnement hydrologique, notamment la dégradation du couvert végétal, est l'objet d'une attention grandissante. La couverture végétale du sol influence directement la réponse hydrologique des bassins versants. Elle joue un rôle complexe d'interface entre le sol et l'atmosphère (Taous, 2005). En effet, dans un terrain nu, l'écoulement dépend principalement de la perméabilité de la surface. Par contre, dans un milieu couvert par la végétation, la capacité de rétention de l'eau dans les sols sera plus importante. Cela peut contribuer dans l'amortissement de la concentration d'écoulement (Lasri, 2015).

Dans le bassin versant de l'oued Melloulou, la répartition spatiale de la couverture végétale dépend de plusieurs facteurs à savoir ; la topographie, l'exposition des versants, le climat et l'anthropisation croissante des milieux ruraux.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**



**Photo 4 : Forêt de Tamtroucht ( commune rurale de Bouiblane ; le 11/10/2016**



**Photo 5 : Forêt de Jbel Ait Boumlal (Commune rurale de Maghraoua) 23/07/2017**



**Photo 6 : Une partie de la forêt de Maghraoua le 25/08/2016**



**Photo 7 : Forêt de Jbel Admam (Commune rurale de Maghraoua) le 30/07/2017**

D'après les résultats extraits des images satellitaires (Landsat 8 OLI) du mois d'aout 2018 et les vérifications fréquentes sur le terrain, nous avons constaté que la forêt dense se concentre en amont du bassin, surtout sur les versants exposés vers l'Ouest. La forêt de Maghraoua et celle de Jbel Admam sont les plus denses (Photo 7). Tandis que le reste du bassin est couvert par des steppes et forêts dégradées, ou des sols nus. Ces derniers sont observés plus en aval. Par ailleurs l'arboriculture en irriguer qui couvre aujourd'hui des superficies importantes.

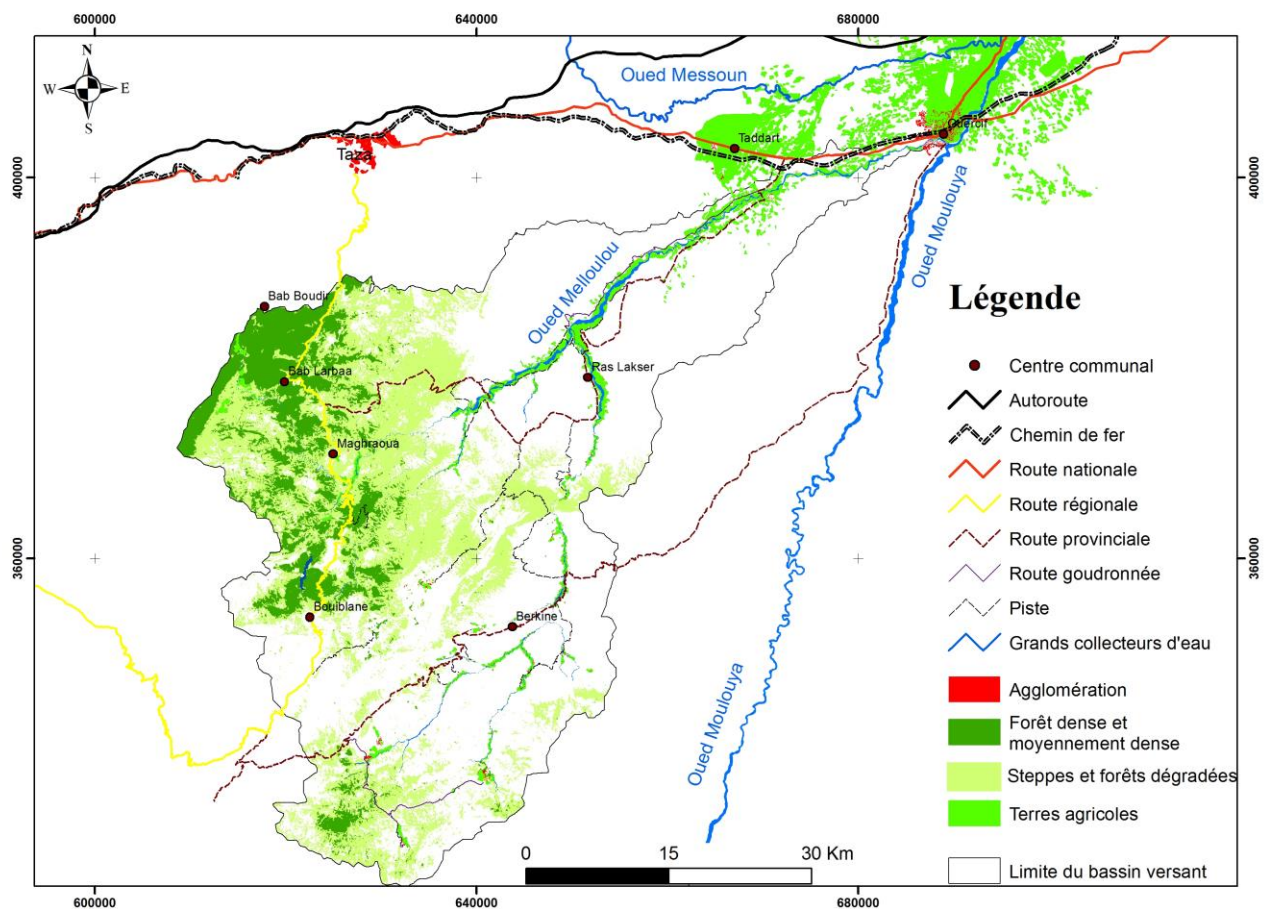
Le tableau 17 montre que les sols nus couvrent environ 64% de la superficie totale du bassin. Cependant, les forêts denses et moyennement denses représentent moins de 10 %. La dégradation successive et rapide de la couverture forestière justifie la grande superficie occupée par les steppes et les matorrals (environ 27% de la surface totale). On peut citer, à

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

titre d'exemple, la situation actuelle de la forêt de Tamjilt et de Berkine. Globalement, ce tapis végétal couvre environ 35% de la superficie totale du bassin versant. Il influence le taux d'évaporation et d'infiltration, la capacité de rétention et la vitesse d'écoulement superficiel

**Tableau 17 : Types d'occupation du sol**

Occupation du sol	Surface en (Ha)	Pourcentage
Sols nus	163883.80	63.72
Steppes et forêt dégradée	69050.70	26.85
Forêt dense à moyennement dense	20266.51	7.88
Agriculture	4000.23	1.56
	257201.24	100.00



**Figure 21 : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (2018)**

**Conclusion du chapitre**

L'analyse des caractéristiques physiographiques est considérée comme la première étape à établir dans l'étude hydrologique. De ce point de vue, nous avons réalisé une analyse détaillée de ces paramètres afin de comprendre leurs influences sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

Les résultats issus de ce travail montrent que le bassin versant de l'oued Melloulou présente, dans sa totalité, une forme relativement compacte en amont et allongée à l'aval, une forte dénivelée théorique avec une topographie contrastée engendrant une forte énergie de relief, des terrains généralement perméables avec une variation du degré de perméabilité entre l'amont et l'aval selon les affleurements lithologiques. Le réseau hydrographique au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou est moins développé. La couverture végétative est plus ou moins importante sur les hautes altitudes et sur les versants ouest et nord-ouest. D'après ces caractéristiques, on peut conclure que la réponse hydrologique tend à être lente avec un écoulement souterrain élevé. L'analyse des caractéristiques morphométriques du bassin nous fournit une vision assez profonde sur l'influence de chaque paramètre et dans chaque sous bassin sur le fonctionnement hydrologique du bassin.

Enfin, le comportement hydrologique d'un bassin versant ne dépend pas uniquement cet élément. Il est conditionné par la pluviométrie qui reçoit et de son régime de distribution spatiotemporelle. Ce travail sera détaillé dans le prochain chapitre.

## CHAPITRE II :

### CONTEXTE CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SON IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

---

#### Sommaire

---

Introduction du chapitre.....	51
1 Données climatiques utilisées.....	51
2 Méthodes de synthèse climatique et d'analyse des données .....	56
3 Contexte climatique aride du bassin versant de l'oued Melloulou.....	67
4 Variabilité spatiale des précipitations et estimation de la lame d'eau précipitée.....	69
5 Variabilité temporelle des précipitations.....	76
6 Variabilité thermique du bassin versant de l'Oued Melloulou .....	106
7 Estimation de l'évapotranspiration.....	124
Conclusion du chapitre.....	130

## **Introduction du chapitre**

Parmi tous les facteurs qui influencent le fonctionnement hydrologique des bassins versants, le climat joue le rôle le plus déterminant. En effet, la pluie constitue la matière première des cours d'eau et les températures interviennent comme le moteur de l'évapotranspiration qui engendre des pertes d'eau non drainées par les écoulements. La connaissance de la nature et des caractéristiques des paramètres climatiques permet donc de conceptualiser et de prévoir leurs effets sur le ruissellement, l'infiltration, l'évapotranspiration et l'apport en eau (Taesombat, 2009). Pour cette finalité, l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques est une étape cruciale pour comprendre le fonctionnement hydrologique de notre zone d'étude.

Ce chapitre présente en premier lieu, une démarche méthodologique pour l'analyse statistique des données climatiques et hydrologiques. En seconde lieu, il expose les principaux résultats relatifs aux différentes fluctuations des précipitations et des températures maximales et minimales, en précisant leurs tendances et les périodes de ruptures au niveau des séries climatiques.

### **1 Données climatiques utilisées**

Les données utilisées dans ce chapitre sont celles des précipitations et des températures. Ces séries temporelles proviennent des différents services qui disposent des archives des données hydroclimatiques à savoir : l'Agence du Bassin Hydraulique de Moulouya, les services provinciaux d'agriculture et des eaux et forêts de Guercif et de Taza. Les données collectées sont celles de 20 stations météorologiques situées à l'intérieur et autour du bassin (Tab. 18). Malgré une couverture assez importante pour le bassin et le travail qu'on a effectué pour leur homogénéisation et le comblement de leurs lacunes, ces données restent hétérogènes (Fig. 22). Les résultats des moyennes annuelles, calculées pour chaque station, seront donc influencés par cette hétérogénéité temporelle. L'ensemble des séries pluviométriques sont utilisées pour visualiser la variabilité spatiale des précipitations au sein du bassin.

En revanche, les données disponibles de la température correspondent à celles enregistrées au niveau de la station de Guercif uniquement.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**Tableau 18 : Situation géographiques de stations climatiques**

Station climatique	Moyenne annuelle (mm)	Latitude	Longitude	Altitude en (m)
Guercif	159	34.220035	-3.36766	365
Berkine	243	33.784663	-3.80037	1304
Belfarah	164	34.120296	-3.67208	556
Ras Lakser	197	33.982905	-3.74701	698
Taddart	170	34.217214	-3.58416	445
Taza	578	34.232427	-4.02022	563
Bab Boudir	1076	34.069031	-4.12149	1342
Bab Azhar	866	34.073619	-4.27259	722
Tahla	578	34.053261	-4.43135	607
Imouzzer Marmoucha	450	33.466997	-4.30323	1635
Missour	150	33.050434	-3.97925	887
Lamrija	163	33.989537	-3.278	663
Rechida	268	33.866045	-3.21942	1448
Maghraoua	420	33.931842	-4.04754	1140
Saka	200	34.623933	-3.41284	745
Tandit	108	33.650075	-3.59342	662
Tamjilt	361	33.645581	-4.00885	1646
Tazzeke	1056	34.028567	-4.27278	1895
Bni Bouyloul	485	33.566412	-3.97654	2087
Bab Larbaa	740	34.002172	-4.10266	1342



## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

Cette base de données a servi pour la cartographie des champs pluviométriques au sein du bassin de l'Oued Melloulou.

En revanche, seules les séries des stations de Berkine (amont), de Belfarah (située à environ 30 km en amont de l'exutoire) et de Guercif (à l'exutoire du bassin), situées à l'intérieur du Bassin de l'Oued Melloulou, ont été utilisées pour étudier la variabilité temporelle des précipitations. Le choix de ces trois stations est basé sur trois critères : 1) la taille de l'échantillon (1970 – 2015) ; 2) leurs positions géographiques par rapport au bassin ; 3) la qualité des données (faiblesse des lacunes dans les séries observées). Leurs résumés statistiques sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 19 : Variation de la pluviométrie annuelle (1970 - 2015) à Berkine, Belfarah et Guercif**

Station	Période	Moyenne (mm)	Max (mm)	Min (mm)	Ecartype	CV %
Belfarah	1970 / 2015	164	327	50	59	36
Guercif	1970 / 2015	159	310	53	57.2	36
Berkine	1970 / 2015	244	441	98	77	31.8

### 1.1 Correction, homogénéisation des données et comblement des lacunes

L'exploitation directe des données collectées peut fournir de mauvais résultats avec des erreurs fatales. Ceci impose donc une vérification préalable des données afin de corriger les erreurs de saisie ou d'enregistrement. Ensuite, l'homogénéisation et le comblement des lacunes restent deux étapes fondamentales avant l'exploitation des séries climatiques.

Le terme "inhomogénéités" représente les variations non naturelles qui sont causées par des modifications dans les réseaux d'observations (observateur, matériel, position de l'appareil de mesure...). L'homogénéisation consiste donc à détecter puis à corriger ces variations (Beaulieu et al. 2010). Ces variations ont deux différentes origines ; soit un changement de tendance ou une rupture naturelle au niveau des données climatiques ou hydrologiques, soit un changement artificiel lié souvent à la nature ou à la situation des matériels de mesure. Plusieurs approches subjectives ont été utilisées pour visualiser les différentes hétérogénéités:

#### ✓ Examen graphique des simples cumules

Il consiste à calculer les cumules de la variable hydroclimatique pour chaque station et à les représenter graphiquement en fonction du temps. Ce test est utilisé pour vérifier l'homogénéité d'une série par rapport à elle-même. La pente de la droite et le coefficient de

corrélations ( $R^2$ ) obtenus à partir de ces graphiques permettent de constater la qualité des données disponibles.

✓ **Examen graphique des doubles cumules**

Il est basé sur la comparaison des totaux mensuels ou annuels progressivement cumulés de la série que l'on veut contrôler ( $y(i)$ ) et d'une série de référence ( $x(i)$ ) qui peut être soit celle d'un poste fiable, soit d'une série fictive correspondant à une moyenne régionale (indice régional). On trace donc, pour chaque station, un graphique avec des points constitués par les couples des cumuls progressifs  $\sum_n^1 x_i \sum_n^1 y_i$  (Sebbar, 2013). Certains auteurs considèrent, Tant que  $R^2$  est supérieur à 0.7, la corrélation peut être considérée comme satisfaisante ; à plus de 0.8 la corrélation est bonne (Obda, 1991).

✓ **Comblement des lacunes**

Les données manquantes sont considérées comme l'un des principaux problèmes que l'en rencontre le plus souvent en analyse hydroclimatique (Sebbar, 2013). La résolution de ce problème est indispensable pour avoir des résultats fiables lors de l'analyse statistique des données hydroclimatiques.

La méthode de comblement des lacunes la plus connue est celle basée sur des modèles de régression simple entre les données des stations faisant partir d'un même territoire climatique homogène. Ce modèle de régression peut être appliqué aux pas de temps annuel et mensuel. Le cas le plus simple est celui d'un modèle de régression entre deux stations. Ce modèle correspond à une simple régression linéaire entre la variable prédictive "X" (station dont les données sont complètes) et la station au niveau de laquelle on effectue le comblement "P". Avant de construire ce modèle de comblement des données manquantes, le coefficient de corrélation "R" entre les données des deux stations doit être calculé et la significativité de la corrélation doit être validée au seuil  $\alpha=0.05$ , selon la table de Bravais-Pearson. Ensuite, les coefficients de régression (la pente a et la constante b) du modèle de régression linéaire ( $P = a * X + b$ ) doivent être testés selon le test "t" de Student et la valeur de la p-value associée à chaque coefficient qui doit être très proche de la valeur 0. L'ajustement de ce modèle est basé sur la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) qui consiste à trouver les valeurs de "a" et "b" qui minimisent la somme des carrés des écarts

entre les vraies valeurs de P et les valeurs prédites avec le modèle de prédiction (Groupe Chadule, 1987).

## **2 Méthodes de synthèse climatique et d'analyse des données**

Dans le contexte des changements climatiques actuels, l'évaluation de la variabilité spatiotemporelle des paramètres hydroclimatiques a une importance primordiale. Ainsi, l'importance des conclusions tirées à partir des résultats d'analyses statistiques devient de plus en plus importante. En statistique, les résultats ne dépendent pas seulement des données collectées mais aussi de la méthode d'analyse choisie. Pour cette étude, nous avons opté pour les indices et les tests statistiques les plus fréquemment utilisés et cités en littérature.

### **2.1 Synthèse climatique : Indices d'aridité**

L'aridité correspond à un déficit pluviométrique presque permanent. Ce déficit est expliqué par la position géographique de ce milieu aride par rapport à la circulation atmosphérique générale et aux caractéristiques locales (relief, courant océanique, continentalité,...). En général, le milieu aride est marqué par une forte évapotranspiration, excédant l'offre en eau des pluies extrêmement variable d'une année à une autre, et des déficits hydriques pendant la majeure partie de l'année. Malgré tout, des pluies à caractère orageux violent et d'une courte durée surviennent souvent en saison chaude. L'aridité se différencie de la sécheresse, phénomène climatique qui survient aussi bien dans les milieux arides que dans les milieux les plus humides (Servat et al., 2009). D'un point de vue biogéographique, une région est considérée comme aride lorsque le manque d'eau empêche la croissance et le développement de la végétation et limite la présence d'une vie animale (Durand, 1988). Le cycle hydrologique en milieu aride est en étroite relation avec l'irrégularité des apports pluviométriques et les cours d'eau sont intermittents (Joly, 2006). La caractérisation du degré de l'aridité est réalisée selon des indices synthétiques qui sont souvent basés sur les données moyennes de la pluviométrie et de la température. Les indices les plus connus sont ceux de De Martonne (1926), d'Emberger (1931), de Thornthwaite (1948), de Dubief (1950), de Capot-Rey (1951), de Bagnouls et Gausson (1952) et de Birot (1953). D'autres indices font référence à la demande évaporatoire de l'atmosphère (UNEP, 1997 ; Floret et Pontanier 1984). Généralement, ces indices sont calculés sur la base de données climatiques aux pas

## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

de temps annuel ou mensuel, et sont surtout utilisables à petite et moyenne échelle. Dans cette étude, nous discutons trois indices.

### 2.1.1 Indice d'aridité annuelle de De Martonne (1926)

De Martonne (1926) a proposé un indice simple pour calculer le degré d'aridité annuelle pour une station quelconque. Cet indice est basé sur la température moyenne annuelle et la moyenne du total annuel des pluies. Il s'exprime par la formule suivante :

**IM = P/T + 10** avec *P* : le cumul des pluies annuelles en (mm) ; *T* : la température moyenne annuelle en (°C) ; *IM* : indice d'aridité annuelle

De Martonne a présenté, également, une classification des types de climats (six grands types) selon les valeurs de l'indice **IM**. Le tableau ci-dessous (Tab. 20) résume les types de climats selon cet indice.

**Tableau 20 : Classification des types de climat en fonction de l'indice IM (cité par Sebaibi (2014))**

Valeur de IM	Type de climat	Signification
IM < 5	Aridité absolue	Désert sans culture
5 < IM < 10	Désert (Aride)	Désert et steppe ; aucune culture sans irrigation
10 < IM < 20	Semi-aride	Formations herbacées, steppes ou savanes. Irrigation nécessaire pour les cultures exigeantes des apports en eau
20 < IM < 30	Subhumide	Prairie naturelle ; irrigation généralement non nécessaire
30 < IM < 40	Humide	Les arbres jouent un rôle de plus en plus grand dans le paysage
IM > 40	Hyper-humide	La forêt est partout la formation climacique. Les cultures de céréales tendent à être remplacées par les herbages

### 2.1.2 Indice d'aridité UNEP (1997)

Cet indice a été utilisé par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO.org) dans le cadre du « Programme des Nations unies pour l'environnement » pour exprimer le degré d'aridité dans une région donnée. Ce dernier est basé sur la pluie et la demande évaporatoire de l'atmosphère. Il s'écrit comme suit :

**AI = P/ETP** avec *P* : moyenne du cumul annuel des précipitations en mm ; *ETP* : moyenne du cumul annuel de l'évapotranspiration potentielle en mm.

L'indice d'aridité d'UNEP traduit le déficit annuel entre la quantité des précipitations reçue (*P*) par rapport à la demande évaporatoire de l'atmosphère (*ETP*) (Mokhtari et al., 2014). Plus les valeurs de l'indice sont faibles et tendent vers la valeur 0, plus l'aridité est élevée. La classification des types de climats proposée par la FAO à base de l'indice AI est présentée dans le tableau 21.

**Tableau 21 : Classification des types de climat en fonction de l'indice AI =P/ETP**

Hyperaride HA	$I \leq 0,05$
Aride A	$0,05 < I \leq 0,20$
Semi-aride SA	$0,20 < I \leq 0,50$
Subhumide SH	$0,50 < I \leq 0,65$
Humide H	$I > 0,65$

## 2.2 Evaluation du degré de la sécheresse annuelle selon l'indice pluviométrique de Nicholson

Nicholson et al. (1988) ont défini un indice pluviométrique, calculé chaque année, pour identifier les années excédentaires et déficitaires (El Meddahi, 2016 et Kouassi et al., 2010).

Il s'exprime par:

$$In = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma}$$

Avec :  $X_i$  : la hauteur des précipitations d'une année  $i$ .  $\bar{X}$  : moyenne de la hauteur de pluie sur la période d'étude.  $\sigma$  : est l'écart-type calculé sur la période d'étude.

**Tableau 22 : Classification de la sécheresse selon l'Indice de Nicholson (SPI)**

Classes du SPI	Degré de la sécheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1 < SPI < 2$	Humidité forte
$0 < SPI < 1$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 0$	Sécheresse modérée
$-2 < SPI < -1$	Sécheresse forte
$SPI < -2$	Sécheresse extrême

Le cumul des valeurs de l'indice de Nicholson nous permet de prendre une idée générale sur les tendances des paramètres hydrométéorologiques et les points de changement dans une série chronologique. La formule des cumuls est la suivante :

$$Z_i = Ip_{i-1} + Ip_i$$

Avec :  $Z_i$ , le cumul de l'indice de Nicholson ;  $Ip_{i-1}$ , l'indice pluviométrique de l'année  $i-1$  ;  $Ip_i$ , la valeur de l'indice pluviométrique de l'année  $i$ .

## 2.3 Tests de tendance

Une tendance est un changement graduel dans les propriétés d'une variable aléatoire. Elle peut résulter par exemple d'un réchauffement climatique, de l'aménagement progressif d'un bassin versant, ... (Wilcoxa. C et al., 2018). Les tests statistiques de tendances permettant de

dégager ou d'estimer l'existence ou non d'une tendance dans une série hydrométéorologiques en mesurant leur degré de significativité. Le test classique Mann-Kendall et le test séquentiel de Mann-Kendall sont les plus utilisés.

### 2.3.1 Test classique de Mann-Kendall

Le test de tendance de Mann-Kendall (Mann, 1945 et Kendall, 1975) permet de tester la stabilité de la moyenne et de la variance des séries hydrométéorologiques sur une période donnée (El Meddahi, 2016). C'est un test non paramétrique exigeant uniquement que les données soient indépendantes, sans tenir compte de la normalité de la distribution (Gocic et al., 2013). La statistique de Mann-Kendall est calculée comme suit :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i)$$

Où  $n$  est la longueur de la série de données,  $x_i$  et  $x_j$  sont les valeurs de données dans les séries temporelles  $i$  et  $j$  ( $j > i$ ), respectivement, avec  $\text{sgn}(x_j - x_i)$  répond à la fonction de signe suivante :

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases}$$

La présence d'une tendance statistiquement significative est évaluée en utilisant la valeur de  $Z$ :

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases}$$

Les valeurs positives de  $Z_S$  indiquent des tendances à la hausse alors que les valeurs négatives de  $Z_S$  indiquent des tendances à la baisse. Le test de tendance est effectué à un niveau de signification  $\alpha$  spécifique. Lorsque  $|Z_S| > Z_{1-\alpha/2}$ , l'hypothèse nulle est rejetée et une tendance significative existe dans la série temporelle.  $Z_{1-\alpha/2}$  est obtenu à partir de la table de distribution normale standard (Douglas et al., 2000). Dans cette étude, le niveau de signification choisi est de  $\alpha = 0,05$ . Au niveau de significativité de 5%, l'hypothèse nulle « absence de tendance » est rejetée si  $|Z_S| > 1,96$  (Kisi et al., 2014). Cette méthode est

installée sur l'extension XLSTAT sous le logiciel Microsoft Excel, ainsi que dans l'application MAKESENS, créée par l'Institut Météorologique Finlandais.

### 2.3.2 Estimation de la pente de Sen

Lorsque l'hypothèse nulle est rejetée « absence de tendance est rejetée », la méthode proposée par Sen (1968) est utilisée pour estimer l'ampleur de cette tendance. Elle consiste à calculer les pentes de toutes les données de la série selon la formule suivante (Fossou et al., 2016).

$$P = (x_j - x_k) / (j - k) \text{ Pour } i=1... n$$

Où  $X_j$  et  $X_k$  sont les valeurs de données au moment  $j$  et  $k$ , respectivement, avec  $j > k$ .

### 2.3.3 Test « de tendance » séquentiel de Mann-Kendall.

Appliqué aux séries temporelles " $x_i$ ", ce test est utilisé pour tester l'hypothèse d'un point de commencement de la tendance dans l'échantillon, séries chronologiques, à long terme (Aït-Mesbah, 2012). Il est calculé en utilisant les valeurs classées " $y_i$ " des valeurs d'origine dans l'analyse ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \dots$ ). Les grandeurs de  $y_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) sont comparées avec  $y_j$ , ( $j = 1, 2, 3, \dots, i - 1$ ). Pour chaque comparaison, les cas où  $y_i > y_j$  sont comptés et désignés par  $n_i$ . Une statistique  $t_i$  peut donc être définie comme (Feidas and al. 2004 et Soumendu and al, 2014) :

$$t_i = \sum_{j=1}^i n_i \quad (1)$$

La distribution de la statistique de test  $t_i$  a une moyenne  $E(t_i) = \frac{i(i-1)}{4}$  (2) et une

$$\text{variance } Var(t_i) = \frac{i(i-1)(2i+5)}{72} \quad (3).$$

Les valeurs séquentielles d'une variable réduite ou standardisée, appelée statistique  $u(t_i)$ , sont calculées pour chacune des variables statistiques du test  $t_i$  comme suit :

$$u(t_i) = \frac{[t_i - E(t_i)]}{\sqrt{\text{var}(t_i)}} \quad (4)$$

Alors que la statistique séquentielle directe  $u(t_i)$  est estimée en utilisant la série temporelle d'origine ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n \dots$ ), les valeurs de la statistique séquentielle rétrograde  $u'(t_i)$  sont estimées de la même manière, mais à partir de la fin de la série. En estimant  $u'(t_i)$ , la série

temporelle est utilisée de telle sorte que la dernière valeur de la série temporelle d'origine arrive en premier ( $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$ ).

La version séquentielle de la statistique du test de Mann-Kendall permet de détecter le début approximatif d'une tendance en progression. La tendance est croissante ou décroissante suivant le signe de  $u(t_j)$ . En portant graphiquement les deux tests ( $u(t_j)$  et  $u'(t_j)$ ), on obtient deux courbes qui se croisent approximativement au moment où a commencé la tendance. Si l'intersection des deux courbes se produit au-delà de  $\pm 1.96$  (niveau de 5%) de la statistique normalisée, on peut déduire un changement détectable à ce point de la série temporelle. En outre, si au moins une valeur de la variable réduite est supérieure à un niveau de signification choisie de la distribution gaussienne, l'hypothèse nulle ( $H_0$  : L'échantillon sous enquête ne montre aucun début d'une nouvelle tendance) est rejetée.

En principe, on considère que la tendance est significative si au moins une des deux courbes dépasse  $\pm 1.96$  qui représente la valeur du test de Mann Kendall au seuil de 0.05. En pratique, l'absence de toute tendance donne généralement des courbes qui s'enchevêtrent tandis que dans le cas d'une tendance significative l'intersection de ces courbes permet de situer approximativement le début du phénomène.

#### **2.4 Tests de détection des ruptures**

Cette démarche statistique non paramétrique est utilisée pour caractériser d'éventuelles ruptures dans les séries hydrométéorologiques.

Une "rupture" peut être définie de façon générale par un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné, le plus souvent inconnu (Soro et al., 2011). Une telle rupture empreinte un changement dans le régime pluviométrique ou hydrologique. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour la détection des ruptures au niveau des séries chronologiques. Pour mener cette tâche d'analyse, nous avons choisis les 4 tests programmés dans le logiciel "*Khronostat*" de l'IRD (1998). Ce choix est justifié par la puissance et la robustesse de ces tests qui sont fréquemment utilisés dans les études hydroclimatiques.

### 2.4.1 Test de Pettitt

Le test de Pettitt (1979) est un test non-paramétrique. C'est une version modifiée du test de Mann-Whitney (Fossou et al., 2016). Il consiste à découper la série principale de N individus en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1 et N-1 (Kingumbi, 2006). La finalité principale est de tester la stationnarité ou non d'une série hydrométéorologique. L'absence d'une rupture dans la série ( $X_i$ ) de taille N constitue l'hypothèse nulle. La mise en œuvre du test suppose que pour tout instant t compris entre 1 et N, les séries chronologiques ( $X_i$ )  $i=1$  à t et t+1 à N appartiennent à la même population. La variable à tester est le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$  définie par :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij}$$

où  $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$ , avec  $\text{sgn}(X) = 1$  si  $X > 0$ , 0 si  $X = 0$  et -1 si  $X < 0$ .

Au cas où l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable  $U_{t,N}$ .

### 2.4.2 Statistique de Buishand

Le test de Buishand (1982 et 1984) est un test paramétrique. Il s'applique aux distributions normales et suppose un non changement de la variance de la distribution. En supposant une distribution à priori uniforme pour la position du point de rupture, la formule du test est :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left( \frac{S_k}{D_x} \right)^2}{N(N-1)}$$

$$S_k = \sum_{t=1}^k (X_t - \bar{X})$$

Pour  $k=1, 2, 3 \dots N$  et  $D_x$  l'écart-type de la série.

L'hypothèse nulle est l'absence de rupture dans la série. En cas de rejet de cette hypothèse, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par ce test. La statistique  $U$  de Buishand donne moins de poids aux premières et aux dernières valeurs de la série et s'avère donc plus performante pour tout changement de moyenne intervenant au milieu de la série.

Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série (xi). La variable Sk, définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle de variance. Sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série (xi) (El Meddahi, 2016), il est possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance 1-α/2 donné, contenant la série des Sk (Bois, 1971, 1986). Cette région de confiance, ellipse de contrôle, est définie par :

$$U_{(1-\alpha)/2} \sqrt{\frac{K(n-K)}{(n-1)}}$$

### **2.4.3 Procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques (d'Hubert).**

Le principe de la procédure de segmentation d'Hubert (Hubert et al., 1989) consiste à diviser la série en m segments (m>1) de telle manière que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du segment voisin.

Soit une série chronologique Xi, i = 1, N. Toute série Xi pour i = i1, i2 telle que i1 ≥ 1, i2 ≤ N et i1 < i2 constitue un segment de la série initiale. Toute partition de la série initiale en m segments constitue une segmentation d'ordre m de cette série.

Soit une segmentation d'ordre m particulière, on définit ik avec k = 1, ..., m le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du ki<sup>ème</sup> segment avec par convention i0 = 0, et Nk = ik – ik-1 la longueur

$$\bar{x}_k = \frac{1}{N_k} \left( \sum_{i=1+i_{k-1}}^{i=i_k} x_i \right).$$

La segmentation est retenue lorsque l'écart quadratique entre elle et la série est minimum. Cette condition importante n'est pas suffisante pour la détermination de la segmentation optimale. L'application du test de Scheffé (1959) aide pour détecter chaque nouvelle rupture, les moyennes des deux segments contigus doivent être significativement différentes.

Cette méthode présente l'avantage d'avoir des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique. Elle est considérée comme un test de stationnarité ; « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Elle a été utilisée dans

plusieurs études de changements climatiques notamment en Roumanie (Carbonnel et al., 1994) et surtout en Afrique de l'ouest où elle a été appliquée aux séries des précipitations et des débits de cette région (Hubert et al., 1989).

Les trois tests, de détection de ruptures, choisis ont été regroupés dans un logiciel "Kronostat" d'analyse des séries hydrométéorologiques (IRD, 1998).

## **2.5 Traitement des séries de données journalières à base des indices recommandés par l'OMM**

Les indices utilisés dans ce travail sont ceux recommandés par l'Organisation de la Météorologie Mondiale l'**OMM**, ainsi que par plusieurs auteurs de la communauté scientifique internationale. Ces indices climatiques sont calculés sur la base des données journalières par le logiciel "**RClimDex**", développé en différentes étapes par Peterson et al (2001); Frich et al (2002) et Zhang et al (2004) (<http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>). Ce logiciel "**RClimDex**", écrit en langage R, fournit une interface graphique pour calculer un ensemble d'indices météorologiques.

Les indices climatiques calculés pouvant être utilisées pour décrire l'état et les changements du système climatique, permettent d'étudier statistiquement les variations des aspects climatologiques dépendantes, telles que l'analyse et la comparaison des séries chronologiques, des moyennes, des extrêmes et tendances ... On compte 16 indices liés à la température et 11 aux précipitations, issus des données journalières. Ces derniers nous ont permis de mettre en évidence les tendances climatiques récentes sur 3 décennies.

Pour tester la significativité des tendances climatiques, le logiciel **RClimdex** est basé sur le test de Mann-Kendall et sur la valeur de probabilité de **P-value (ou p-valeur)**. Cette valeur nous permet de trancher sur la question d'une tendance due au hasard ou non. En fixant un seuil comme seuil de significativité de 0.05, on considère que la tendance vers la diminution ou l'augmentation n'est pas le fruit du hasard lorsque la p-value est inférieure au seuil de 0.05. Dans le cas contraire, la p-value dépasse le seuil de 0.05, on a une chance de 5 sur 100 ou plus pour conclure que la tendance observée est due au hasard. Le tableau ci-dessous affiche le degré de significativité des tendances en fonction de la valeur de probabilité p.

**Tableau 23 : Degré de significativité des tendances selon les valeurs de P-Value**

<b>P-Value</b>	<b>Degré de significativité</b>
$P \leq 0.01$	Très forte significativité
$0.01 \leq P \leq 0.05$	Forte significativité
$0.05 \leq P \leq 0.1$	Tendance significative
$P > 0.1$	Faible significativité

Les indices recommandés par l'OMM sont regroupés en 5 groupes :

- (1) Les indices basés sur les valeurs percentiles** (valeurs divisant la distribution en 100 portions égales): – Occurrence des nuits froides (**TN10p: températures minimales inférieures au 10ème percentile**) ; – Présence des nuits chaudes (**TN90p: températures minimales supérieures au 90ème percentile**) ; – Présence de jours froids (**TX10p: températures maximales inférieures au 10ème percentile**) ; – Présence de jours chauds (**TX90p: températures maximales supérieures au 90ème percentile**) ; – Journées très humides (**R95p: pluviométrie journalière supérieure au 95ème percentile**) ; – Jours extrêmement humides (**R99p: pluviométrie journalière supérieure au 95ème percentile**) ;
- (2) Les indices absolus** représentant les valeurs maximales ou minimales pendant une saison ou une année : – Jours les plus chauds (**TXx**) ; – Nuits les plus chaudes (**TNx**) ; – Jours les plus froids (**TXn**) ; – Nuits les plus froides (**TNn**) ; – Maximum d'un jour de précipitations (**RX1j**) ; – Maximum de cinq jours de précipitations (**RX5j**) ;
- (3) Les indices seuils** correspondent au nombre de jours pendant lesquels une valeur de température ou des précipitations sont au-dessus ou en-dessous d'un seuil fixé : – Occurrence annuelle de jours de gel (**FD**) ; Occurrence annuelle de jours de glace (**ID**) ; – Occurrence annuelle des jours d'été (**SU**) ; Occurrence annuelle des nuits tropicales (**TR**) ; – Nombre de jours de fortes précipitations >10 mm (**R10**) ; – Nombre de jours de très fortes précipitations >20 mm (**R20**) ;
- (4) Les indices de durée** sont des périodes de chaleur ou de froid ou d'humidité ou de sécheresse excessive, ou de longueur de la saison de pluies et des périodes de douceur : – Séquences froides (**CSDI**) ; – Séquences chaudes (**WSDI**) ; – Longueur de la saison douce (**GSL**) ; – Séquences de jours secs consécutifs (**CDD**) ; – Séquences de jours de pluie consécutifs (**CWD**) ;

(5) Les autres indices : – Précipitation totale (**PRCPTOT**) ; – Amplitude thermique diurne (**DTR**) ; – Indice simple d'intensité journalière (**ADII**) ; – Plage maximale de température (**ETR**) ; – Contribution annuelle de jours très humides (**R95p**)

## 2.6 Analyse des évènements hydroclimatiques extrêmes selon la loi GEV

L'estimation des valeurs hydroclimatiques extrêmes, susceptibles d'être dépassées en fonction d'un temps de retour donné, est fondamentale en matière de prise de décision et d'aménagement du territoire.

La théorie des valeurs extrêmes (EVT) fournit un cadre théorique pour l'analyse des extrêmes climatiques et hydrologiques de leurs niveaux de retour (Katz et al. 2002 ; Coles 2001). La distribution des maxima ou des minima d'une variable climatique donnée converge vers l'une des trois distributions limites : Gumbel, Fréchet ou Weibull (Katz et al. 2002 ; Leadbetter et al. 1983; Gumbel 1958). La combinaison de ces trois types de distribution est appelée distribution des valeurs extrêmes généralisée (GEV). Sa formulation mathématique est la suivante :

$$H_{\xi,\mu,\sigma}(x) = \exp\left(-\left(1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}\right), \quad \xi \neq 0, \quad 1 + \xi \frac{x-\mu}{\sigma} > 0$$

Elle estime la période de retour des valeurs extrêmes en calculant trois paramètres de distribution : ( $\mu$ ) paramètre de localisation, spécifiant le centre de la distribution ; ( $\sigma$ ) le paramètre d'échelle détermine l'étendue de déviation des valeurs extrêmes par rapport au paramètre de localisation ; et ( $\xi$ ) le paramètre de forme de la distribution de GEV (Cheng et al ; 2014). Le cas limite de  $\xi$  (tend vers 0) correspond à la distribution de Gumbel, alors que si la valeur de  $\xi$  est négative, la distribution est de type Weibull, et si la valeur de  $\xi$  est positive, la distribution est de type Fréchet.

Le programme NEVA (Nonstationary Extreme Value Analysis), développé par Cheng et al (2014), estime la période retour des valeurs extrêmes selon les hypothèses de stationnarité et de non stationnarité des séries. On propose au programme d'effectuer le calcul selon l'une des deux hypothèses. Comme il a été décrit par Hanchane et al (2019), l'hypothèse de stationnarité est vérifiée par le test de Mann-Kendall. L'estimation des périodes et des valeurs de retour repose sur des simulations nommées MCMC (méthode de Monte Carlo par

Chaine de Markov). Cette simulation est souvent utilisée pour résoudre les problèmes de calculs liés à l'approche bayésienne. Le calcul de la période de retour et du niveau de retour des valeurs extrêmes est fourni selon trois méthodes différentes : (a) des niveaux de retour standards dans lesquels la probabilité de dépassement est constante pour toute la période étudiée ; (b) des seuils constants avec des probabilités de dépassement variant avec le temps ; et (c) des niveaux de retour effectifs. Une caractéristique principale de NEVA est qu'elle offre les intervalles de probabilité à posteriori et les limites d'incertitude pour l'estimation des niveaux de retour pour un événement climatique ou hydrologique stationnaire et non-stationnaire (Hanchane, 2016).

### **3 Contexte climatique aride du bassin versant de l'oued Melloulou**

#### **3.1 Contexte climatique du bassin versant de l'oued Melloulou**

L'Oued Melloulou appartient au domaine climatique méditerranéen aride steppique oriental du pays. Il se place aux marges du Rif central au nord, de la Haute Moulouya au sud et du Moyen Atlas Oriental à l'ouest. Sa position continentale lui confère certaines particularités climatiques (Barry et Chorley, 2003): (i) les surfaces se réchauffent rapidement de telle sorte que les écarts entre les apports radiatifs élevés (ou bas) et les températures maximales (ou minimales) sont courts; ils sont d'un mois par rapport aux zones côtières (décalage de plus de 2 mois); (ii) l'amplitude thermique diurne et annuelle sont très fortes. Aussi, il compte parmi les régions de l'Afrique du Nord qui sont marquées par la plus grande variabilité pluviométrique interannuelle (Isnard, 1957). Les précipitations sont concentrées durant la saison printanière (Obda et al., 2009; Hanchane, 2016), dont les valeurs moyennes mensuelles les plus élevées sont enregistrées de mars à mai. Ce régime pluviométrique de type Melouyien, selon Delannoy et Le Compte, est caractéristique du climat du Maroc Oriental. Les pluies, d'origine convective et de forte intensité, engendrent souvent des crues violentes.

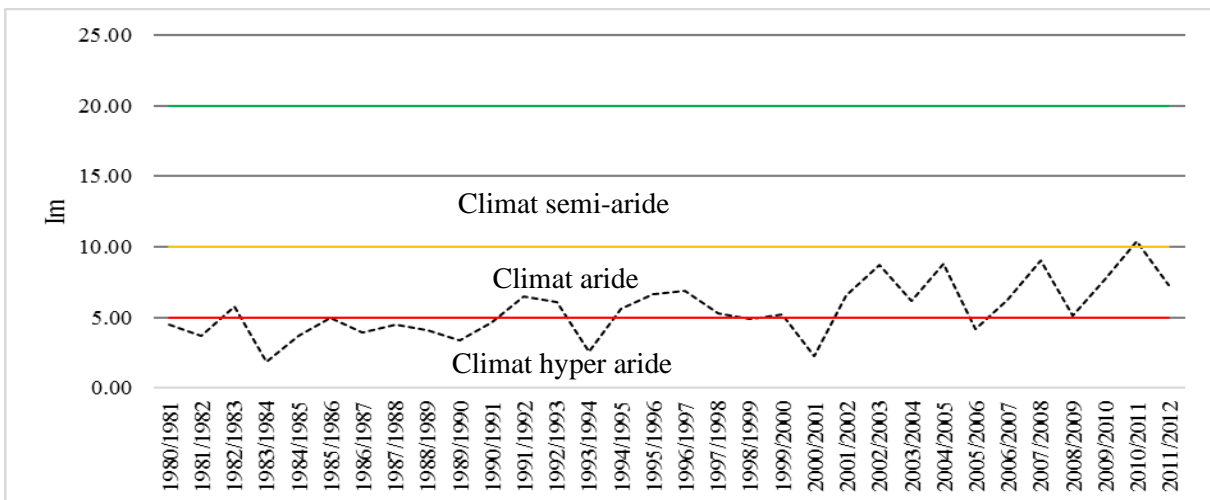
#### **3.2 Caractérisation de l'aridité du bassin**

Puisque l'indice de De Martonne est basé sur les données des températures et des précipitations, il est appliqué seulement aux données de la station de Guercif où l'on dispose d'enregistrements de ces deux éléments climatiques.

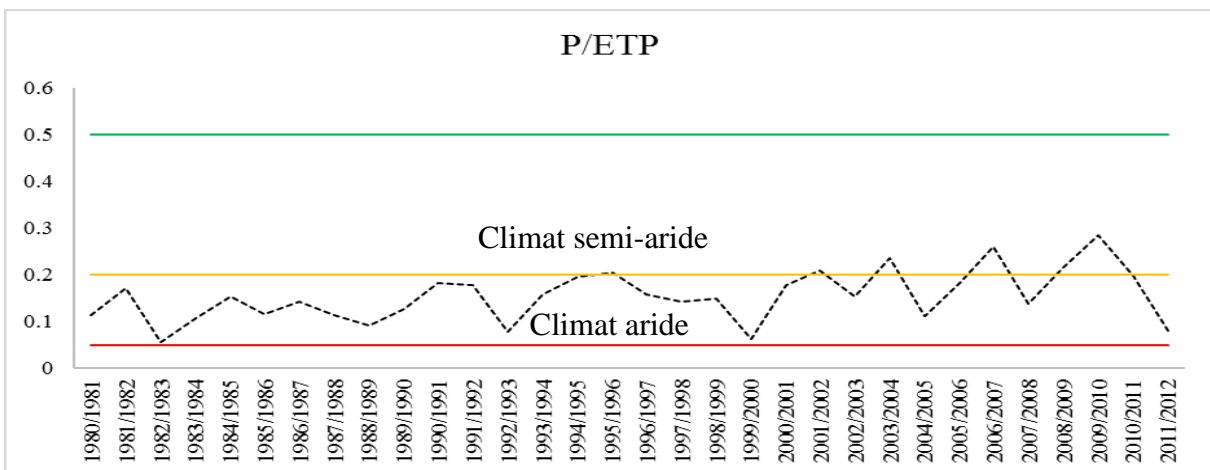
**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

La figure 23 montre, pour la période 1980/1981 - 2011/2012, l'indice « **IM** » oscille entre le climat hyper aride, aridité absolue, et aride. La moyenne de  $I_m$ , calculée sur cette période récente, est de 5.5. Cette valeur signifie que le climat moyen de la région est de type aride. Le même constat est issu également des résultats de l'indice **AI** dont la moyenne calculée sur la même période, égale à 0.15, situe le climat de Guercif dans la classe du climat aride (Fig. 24).

En plus de cette aridité moyenne annuelle, la situation climatique moyenne de la station de Guercif au cours des différents mois de l'année est marquée par un déficit hydrique estimé: le diagramme ombrothermique de Gausse-Bagnouls montre que la courbe de  $2^*T$  (valeur estimant la demande climatique en vapeur d'eau) est toujours supérieure à celle de  $P$  (apport en eau de pluie). Ce résultat indique une sécheresse aigue pendant toute l'année, surtout en périodes estivale et automnale (Fig. 25).



**Figure 23 : Climat du bassin versant de l'oued Melloulou à base de l'indice IM**



**Figure 24 : Climat du bassin versant de l'oued Melloulou à base de l'indice AI**

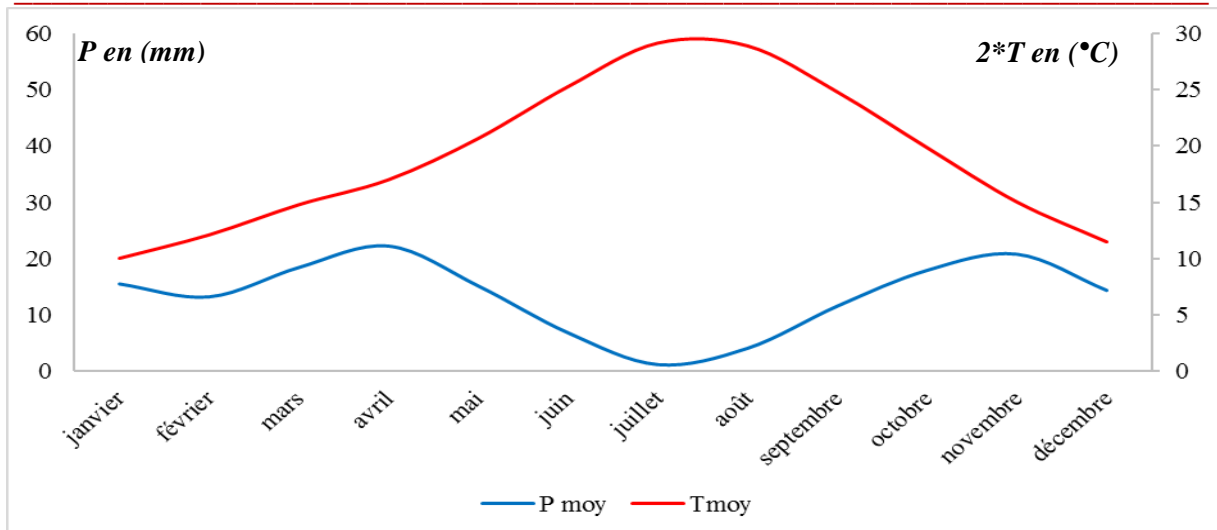


Figure 25 : Diagramme ombrothermique du bassin versant de l'Oued Melloulou à base des données de la station de Guercif.

#### 4 Variabilité spatiale des précipitations et estimation de la lame d'eau précipitée

La pluie influence directement ou indirectement le régime d'écoulement des cours d'eau. Les apports en eau de pluie et leur variabilité sont des indicateurs importants de la disponibilité en eau et de la dynamique des unités paysagères dans un bassin versant. Cette variabilité peut se manifester par de longues périodes de sécheresse avec, pour conséquences, des effets négatifs sur le cycle hydrologique, sur l'environnement et sur les activités socio-économiques (Amoussou, 2010). Cette variabilité est abordée aux échelles spatiale et temporelle. Sa connaissance est un des éléments clés pour la compréhension du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant.

##### 4.1 Variabilité spatiale des précipitations

Au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, les totaux annuels des précipitations varient de l'amont vers l'aval et de l'Ouest vers l'Est, en fonction de l'altitude, de l'exposition des versants...

La distance entre les stations météorologiques utilisées dans cette étude est importante, ce qui présente une couverture du bassin peu satisfaisante pour montrer cette distribution contrastée. Pour cela, l'interpolation des moyennes annuelles calculées est la solution la plus adéquate (Fig. 26). Dans ce contexte, plusieurs modèles géostatistiques fiables programmés sur le logiciel « ArcGis » peuvent résoudre ce problème (Abdelaziz, 2009 ; Gilles, 2004). Parmi les méthodes les plus utiles, la méthode géostatistique du krigeage ordinaire constitue

la meilleure pour comprendre la tendance et pour la prédiction des résultats (Gratton, 2002).

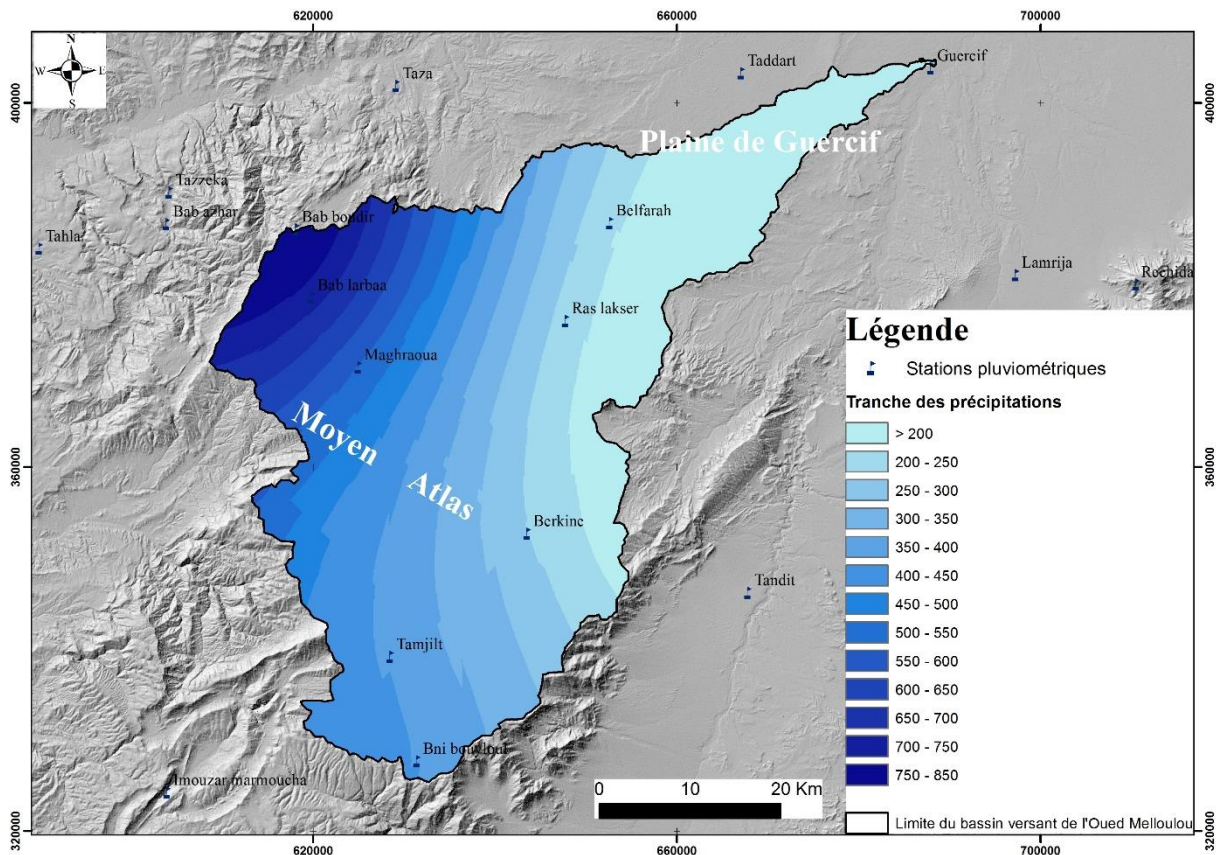
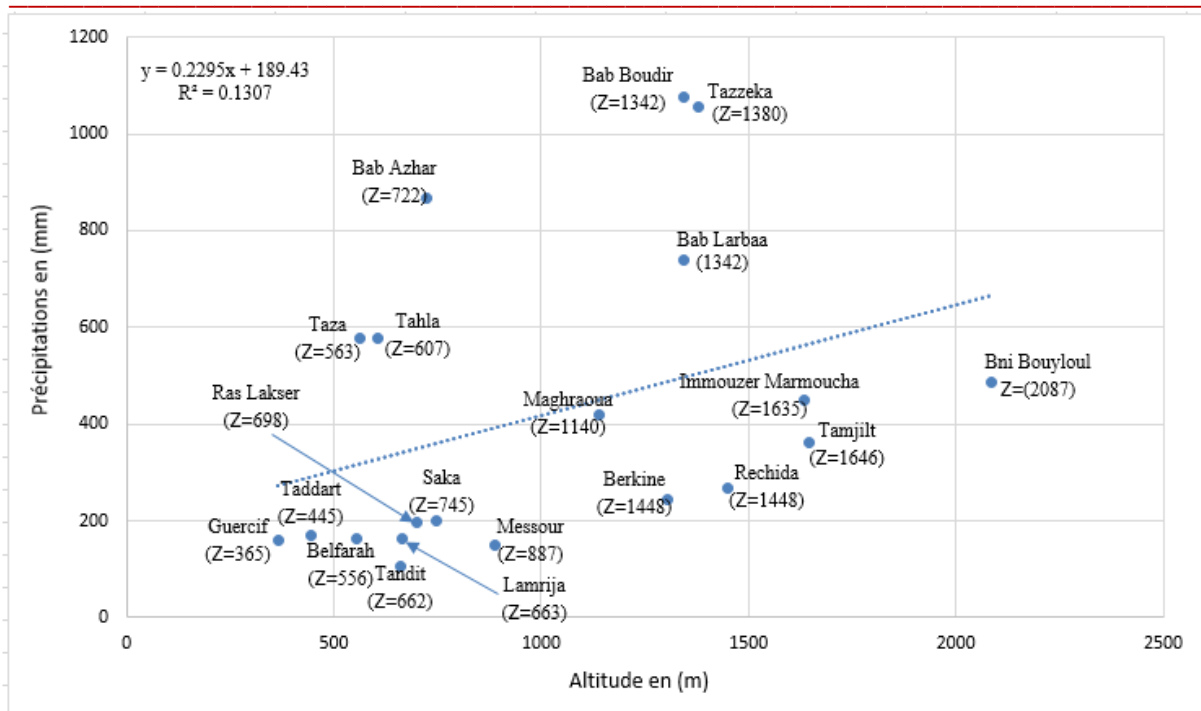


Figure 26 : Spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Oued Melloulou par le biais de la méthode d'interpolation krigeage.

La figure 26 montre que la partie la plus humide est située à l'Ouest du bassin, avec des moyennes annuelles dépassent les 1000 mm/an au niveau des stations de Bab Boudir et de Tazzeke. Tandis que, les valeurs moyennes calculée au niveau des stations de l'est du bassin sont faibles malgré leur situation sur des altitudes élevées, 360 et 470 mm enregistrées à Tamjilt et à Bni Boyloul respectivement. Ce résultat affiche le rôle crucial de l'exposition des versants dans la répartition spatiale des précipitations sur le bassin du Melloulou.

En revanche, l'impact de la variation d'altitude est aussi présent dans la comparaison des valeurs enregistrée en mont et en aval (Fig. 27), la moyenne annuelle estimée à Guercif et à Belfarah ne dépasse pas 200 mm/an. Alors que la moyenne calculée à Bab Larbaa par exemple est de 740 mm/an. Cependant, la figure 30 montre que l'effet de ce facteur dans la distribution de la pluie sur le bassin est peu significatif.



**Figure 27 : Évolution des précipitations en fonction de l'altitude**

#### 4.2 Estimation de la lame d'eau précipitée sur le bassin

De nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour estimer la pluie moyenne tombée sur notre bassin versant à savoir ; la méthode arithmétique, la méthode des isohyètes, de Thiessen, Fonction Spline et Krigeage (Mettin, 1994).

Parmi ces dernières, nous avons opté pour la méthode arithmétique, des isohyètes et de Thiessen dont l'objectif principal est de comparer les résultats et de calculer une valeur moyenne dite fiable à partir des trois méthodes.

##### 4.2.1 Méthode arithmétique

C'est la méthode la plus simple parmi les trois choisies. Elle est basée sur la moyenne spatiale calculée à partir du cumul pluviométrique moyen enregistrée au niveau de toutes les stations sur une période assez longues.

$$P_{moy} = \left( \sum_{i=1}^n P_i \right) / N$$

Avec : **P<sub>moy</sub>** : Précipitation moyenne sur le bassin versant (mm). **P<sub>i</sub>** : Hauteur moyenne des précipitations à la station *i* (mm) **N** : Nombre des stations sur le bassin versant

La lame d'eau précipitée calculée par cette méthode est : **421.6 mm/an**.

Comme nous avons déjà avancé, notre terrain présente une couverture insuffisante en stations de mesure, une répartition spatiale inégale et une forte hétérogénéité de la topographie. La raison pour laquelle cette méthode ne reflète pas exactement la valeur de la lame d'eau tombée sur la totalité du bassin versant. Pour évaluer le degré de confiance de cette méthode, l'estimation du pourcentage d'erreur (E) est possible suivant l'équation suivante :

$$E = \frac{c_v}{\sqrt{n}} \text{ Avec } c_v = \frac{\partial}{P_{moy}}$$

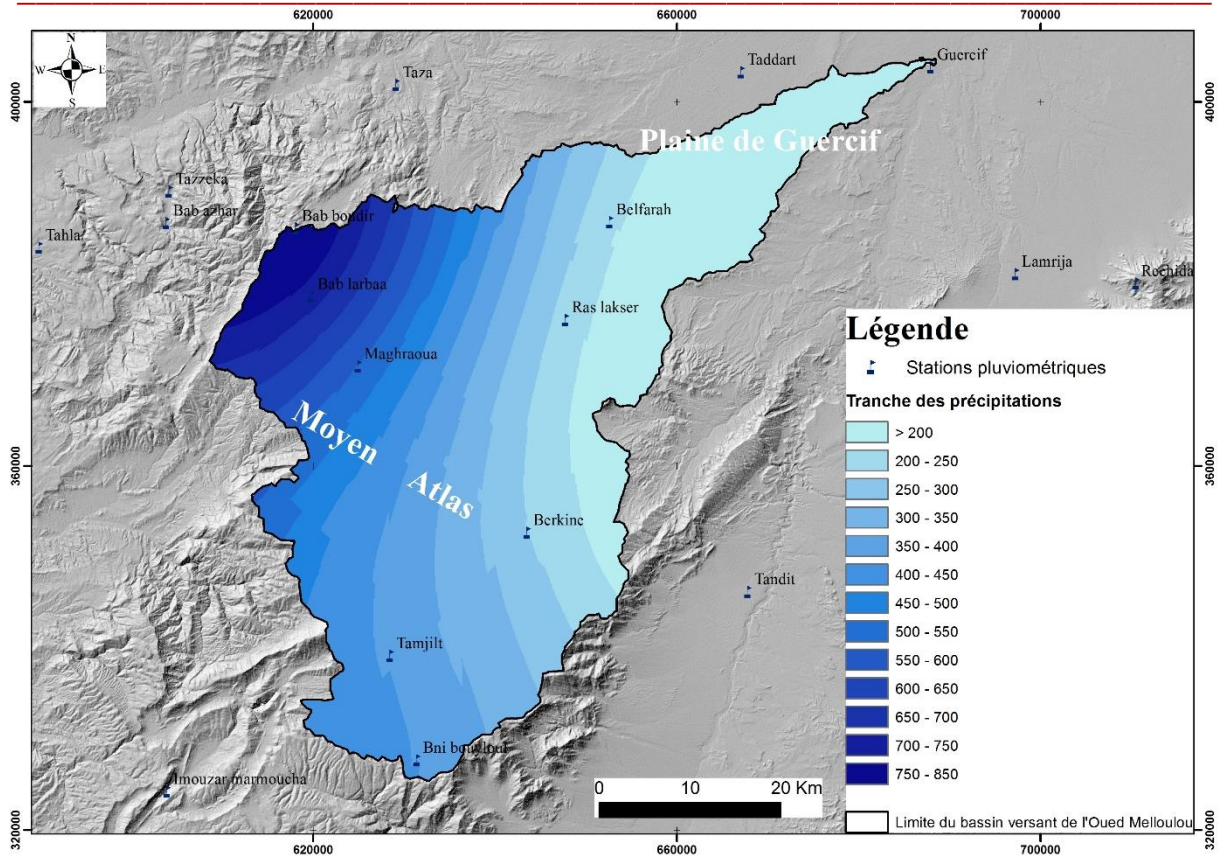
*Avec : n : Nombre de station sur le bassin versant ; P<sub>moy</sub> : Précipitation moyenne du bassin versant ; C<sub>v</sub> : Coefficient de variation ; ∂ : L'écart type*

La marge d'erreur obtenue par cette équation est d'environ **16.5 %**, ce qui signifie que cette formule fournit des grandes marges d'erreur. On fait donc recours à d'autres méthodes graphiques plus fiables.

#### **4.2.2 Méthode des isohyètes**

C'est une méthode graphique, basée sur la spatialisation des précipitations moyennes annuelles enregistrées au niveau des stations climatiques qui couvrent le bassin (Fig 28). Cette méthode est généralement considérée comme la plus précise pour calculer la hauteur moyenne des précipitations sur un bassin (Lasri, 2015). Le modèle utilisé pour tracer les isohyètes est celle du Krigeage ordinaire sur le logiciel ArcGis.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**



**Figure 28 : Spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Oued Melloulou par le biais de la méthode des isohyètes**

Lorsque les courbes isohyètes sont tracées, la lame d'eau précipitée peut être calculée de la manière suivante :

$$P_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{S_T} \text{ Avec } P_i = \frac{h_i + h_{i+1}}{2}$$

Avec : ***P<sub>moy</sub>*** : précipitation moyenne sur le bassin. ***S<sub>T</sub>*** : surface totale du bassin. ***A<sub>i</sub>*** : surface entre deux isohyètes ***i*** et ***i+1***. ***n*** : nombre total d'isohyètes. ***P<sub>i</sub>*** : moyenne des hauteurs ***h*** de précipitations entre deux isohyètes ***i*** et ***i+1***

**Tableau 24 : Lames d'eau précipitées entre les isohyètes**

Tranche de pluie	Pi	Ai	Pi*Ai
> 200	157.5	528.6	83254.5
200 - 250	225	259.0	58275
250 - 300	275	252.9	69547.5
300 - 350	325	293.9	95517.5
350 - 400	375	327.6	122850
400 - 450	425	306.9	130432.5
450 - 500	475	143.0	67925
500 - 550	525	111.6	58590
550 - 600	575	75.4	43355
600 - 650	625	71.6	44743.75
650 - 700	675	71.5	48242.25
700 - 750	725	65.4	47444
750 - 850	800	56.4	45120
Totale		2563.8	915297

La lame d'eau précipitée calculée par cette méthode est : **357 mm**

#### 4.2.3 Méthode de Thiessen

La troisième méthode choisie pour l'estimation de la lame d'eau tombée sur le bassin versant de l'Oued Melloulou est celle de Thiessen, en raison de sa simplicité pour sa mise en œuvre. Les coefficients de Thiessen étant calculés une fois pour tout le bassin versant pour un nombre donné de stations (Pande et al., 1978). La surface d'influence de chaque station de mesure, dite polygone de Thiessen, constitue le facteur de pondération.

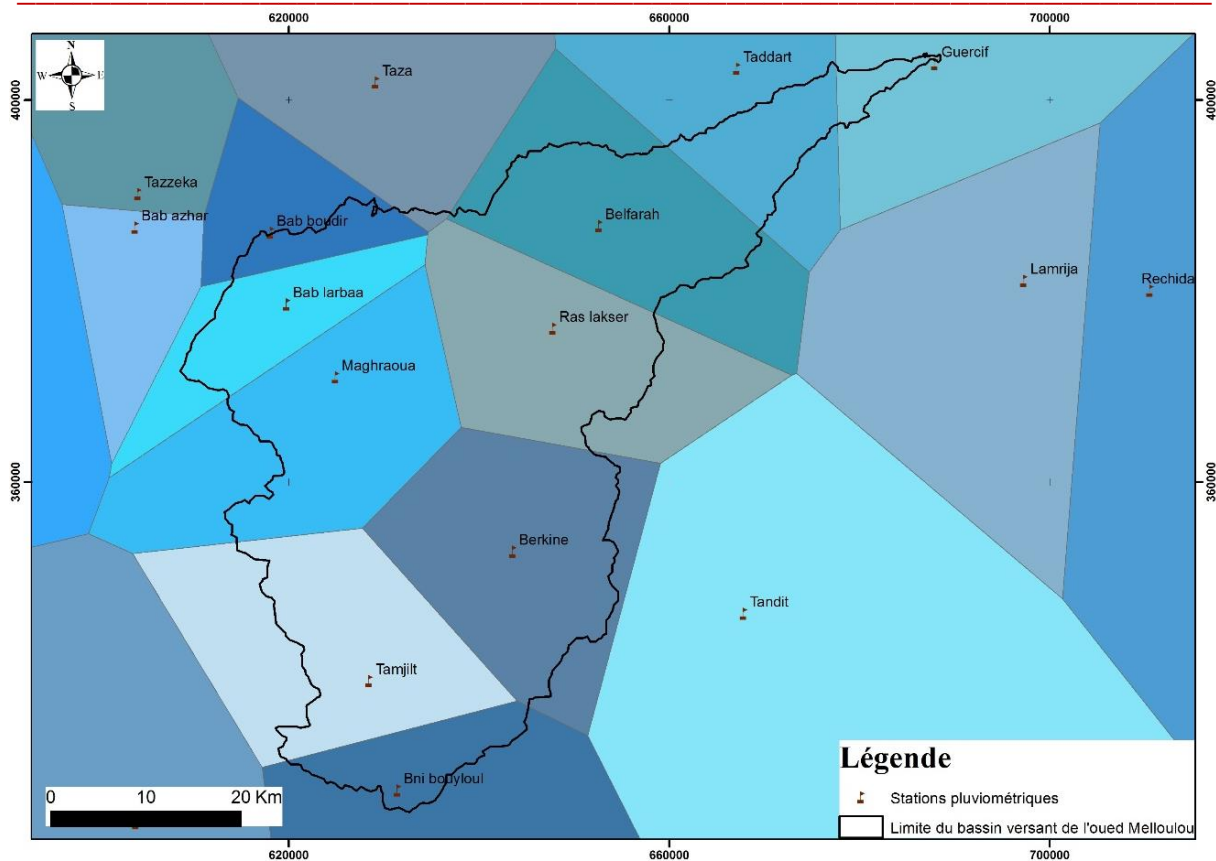
#### 4.2.4 Polygones de Thiessen

Cette méthode consiste à tracer autour des stations pluviométriques des polygones formés selon le poids et la zone d'influence de chaque station. Ces polygones représentent le facteur de pondération de la valeur pluviométrique calculée. Elle convient notamment quand le réseau pluviométrique n'est pas homogène spatialement (pluviomètres distribués irrégulièrement) (Fig 29). Le calcul de la lame d'eau précipitée annuelle faite à base de la formule suivante :

$$LP = \sum_{i=1}^n Pi * Ai / A$$

Avec : **LP** = Lame d'eau précipitée moyenne sur le bassin versant ; **A** = Superficie du bassin versant ; **Ai** = Superficie du polygone lié à la station *i* ; **Pi** = Hauteur de pluie de la station *i*.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**



**Figure 29 : Spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Oued Melloulou par le biais de la méthode de Thiessen**

**Tableau 25 : Lames d'eau précipitées entre les polygones de Thiessen**

Station	Pi	Ai	Ai*pi
Bni bouyloul	485	1262.23	612183.52
Lamrija	163	936.88	152711.16
Bab larbaa	740	265.60	196542.49
Saka	200	931.21	186241.46
Tamjilt	361	587.44	212067.37
Messour	150	3294.39	494158.11
Imouzer Marmoucha	450	1978.23	890203.08
Tandit	108	3781.99	408455.28
Rechida	268	868.47	232749.17
Taddart	170	1089.66	185242.28
Guercif	158	743.93	117541.20
Tazzeka	1056	938.08	990618.50
Maghraoua	420	609.16	255848.95
Tahla	578	727.39	420431.12
Bab Azher	866	230.58	199681.07
Bab Boudir	1076	240.19	258439.11
Taza	578	1596.49	922773.01
Ras Lakser	197	538.10	106005.57
Belfarah	164	586.04	96109.98
Berkine	273	588.94	160781.28
Totale		21795.01	7098783.69

#### 4.2.5 Coefficients de Thiessen

Les coefficients de Thiessen  $C_i$ , représentent les coefficients barycentriques à afficher à chaque poste pluviométrique  $i$  :

$$C_i = S_i/S$$

Avec  $S_i$  = Superficie du polygone lié à la station  $i$  ;  $S$  = Superficie du bassin versant.

Ainsi, la formule donnant la lame d'eau précipitée devient :

$$L_p = \sum(C_i \times P_i)$$

#### 4.3 Résultats des trois méthodes précédentes

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats de la lame d'eau précipitée calculée à base des trois méthodes choisies. Pour minimiser l'erreur de l'estimation, nous avons utilisé la moyenne des trois valeurs. La lame d'eau tombée est alors de 368 mm.

**Tableau 26 : Lamme d'eau précipitée estimée par les trois méthodes précédentes**

	Méthode arithmétique	Polygone de Thiessen	Méthode des isohyètes
Lamme d'eau estimée	421.6	325.7	357
Lamme d'eau moyenne	368		

A partir des derniers résultats, on peut estimer le volume d'eau moyen annuel que reçoit le bassin de Melloulou par l'équation suivante :

$$V_p = L_p \times A$$

Avec :  $L_p$  = Lamme d'eau précipitée moyenne sur le bassin versant ;  $A$  : Superficie totale du bassin versant.

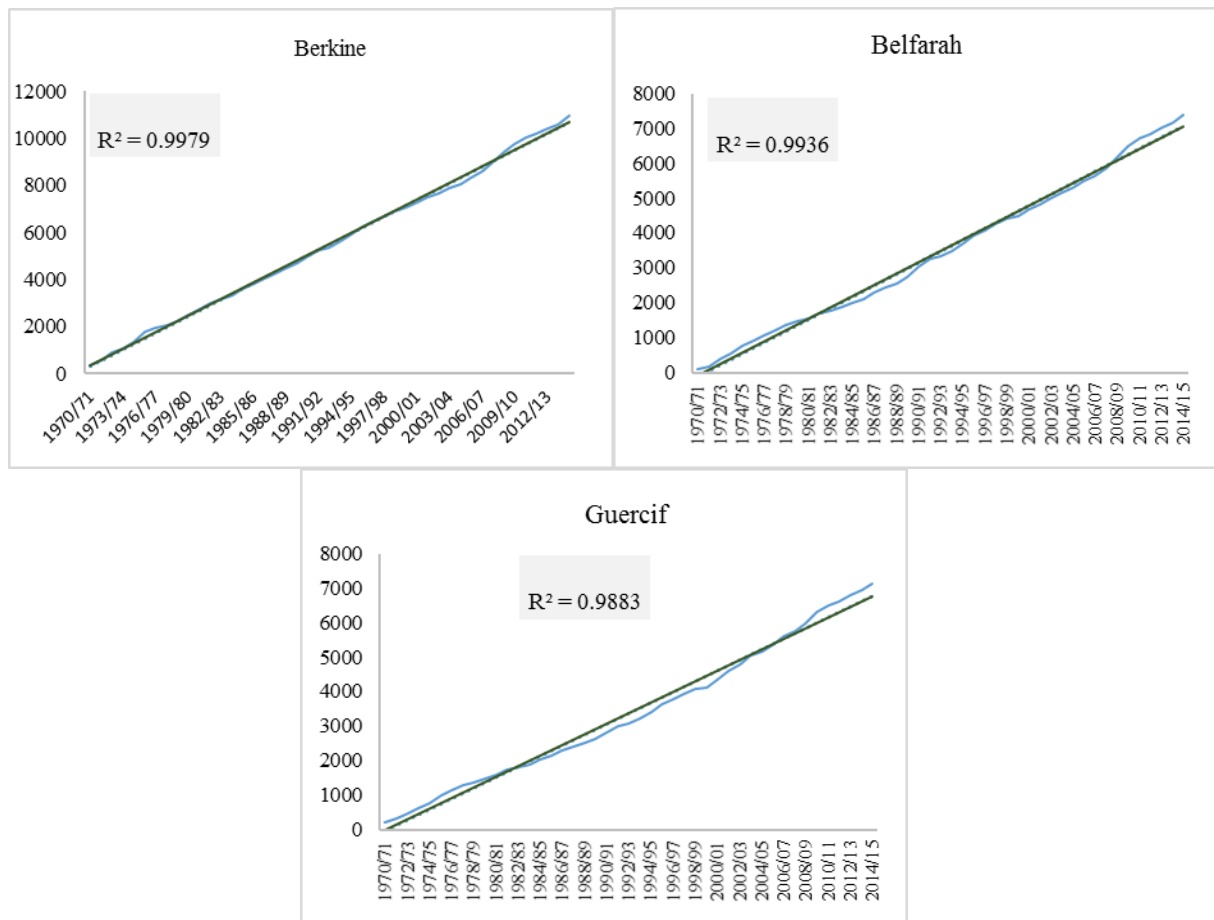
Le volume d'eau moyenne tombée sur le bassin versant de l'Oued Melloulou est de  $920 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/an. Cela signifie que notre bassin reçoit environ 920 Million m<sup>3</sup>/an d'eau sous forme de pluie.

## 5 Variabilité temporelle des précipitations

Comme cité précédemment, l'analyse de la variabilité temporelle des précipitations sera basée sur les données des séries pluviométriques de Berkine, de Belfarah et de Guercif. Ces données proviennent de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya. Elles sont de qualité et de durée acceptable (entre 1970 et 2015)

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Les résultats issus du test des simples cumules montrent que  $R^2$  est supérieur à 0.9 (Fig. 30). Cela signifie que nos données sont de bonne qualité.



**Figure 30 : Méthode des simples cumuls**

Au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, la station hydrométéorologique principale et la plus fiable est celle de Guercif. Pour cela, nous l'avons choisi comme une station de référence. Les graphiques obtenus de l'application de la méthode des doubles cumules présentent une forte corrélation entre les séries, avec un  $R^2$  dépassant 0.98 (Fig. 31). Nos données utilisées sont alors de bonne qualité. Ainsi, il semble qu'il y a une petite anomalie observée en 1999/2000. Cela peut être un indicateur d'un changement dans la tendance pluviométrique au niveau de la zone d'étude.

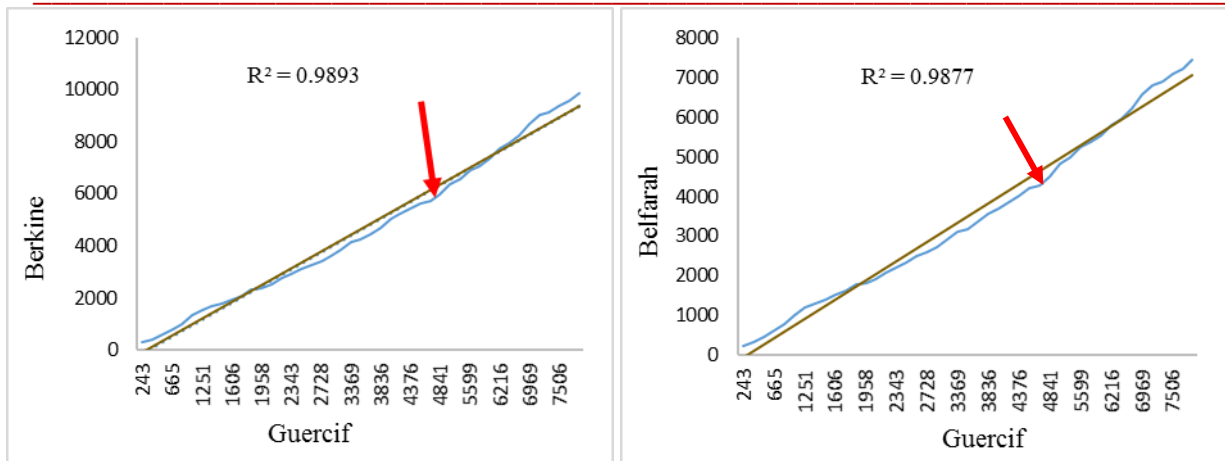


Figure 31 : Méthode de doubles cumules

## 5.1 Variabilité interannuelle des précipitations

### 5.1.1 Résultats issus de l'indice de Nicholson

Les résultats obtenus de l'indice de Nicholson, appliqué aux cumuls annuels de la pluviométrie, montrent une forte alternance des épisodes humides et d'autres sèches (Fig. 32). Ainsi, une période de sécheresse s'étale de 1975 jusqu'au début des années 1990 a été observée. Ce constat est observé plus au niveau des données de Guercif et de Belfarah qu'à Berkine. Cependant, un retour de pluie a été constaté et s'étale jusqu'au 2015, avec une variabilité remarquable des valeurs enregistrées d'une année à une autre. La moyenne calculée entre 1975 et 1990 au niveau de la station de Berkine, par exemple, est de 232 mm/an, alors qu'elle est de 250 mm/an entre 1990 et 2015.

Par ailleurs, au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, le nombre d'années déficitaires est toujours supérieur à celui des années excédentaires (Tab 27). En effet, la fréquence des années de déficit est de 53.3 % enregistrée à Berkine et à Guercif et de 55.6% observée à Belfarah (Tab. 27).

Par ailleurs, au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, le nombre d'années déficitaires est toujours supérieur à celui des années excédentaires (Tab 27). En effet, la fréquence des années de déficit est de 53.3 % enregistrée à Berkine et à Guercif et de 55.6% observée à Belfarah (Tab. 27).

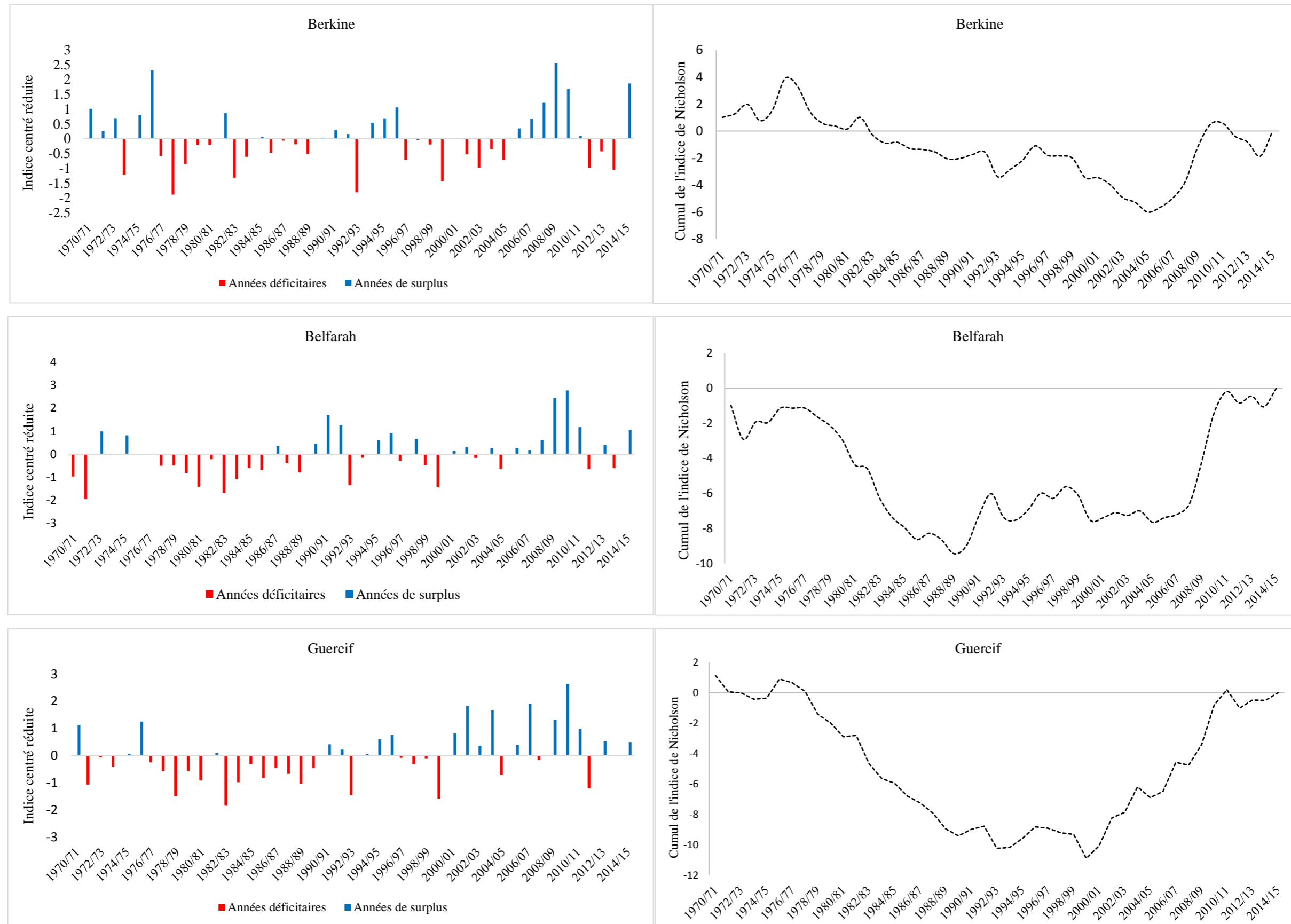


Figure 32 : Présentation graphique des résultats de l'indice de Nicholson appliqué aux pluies annuelles des trois stations de la zone d'étude.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**Tableau 27 : Nombre d'années déficitaires et excédentaires selon les résultats de l'indice de Nicholson**

	Période	Nombre d'années déficitaires	Pourcentage	Nombre d'années de surplus	Pourcentage
<b>Berkine</b>	1970 / 2015	24	53.3	21	46.7
<b>Belfarah</b>	1970 / 2015	25	55.6	20	44.4
<b>Guercif</b>	1970 / 2015	24	53.3	21	46.7

Selon la classification de Nicholson, citée dans le tableau 25, 40 % des années ont enregistré une sécheresse modérée, 13 à 15 % de forte sécheresse, 30 % des années sont légèrement humides, 11% de forte humidité et seulement 3.3 % des années ont été extrêmement humides (Tab. 28).

**Tableau 28 : Nombre d'années et pourcentage de chaque classe de l'indice de Nicholson**

Classes de l'indice	Signification	Station de Berkine	Fréquence en %	Station de Belfarah	Fréquence en %	Station de Guercif	Fréquence en %
>2	Humidité extrême	2	4.4	2	4.4	1	2.2
Entre 1 et 2	Humidité forte	5	11.1	4	8.9	6	13.3
Entre 0 et 1	Humidité modérée	14	31.1	14	31.1	13	28.9
Entre -1 et 0	Sècheresse modérée	18	40.0	19	42.2	18	40.0
Entre -2 et -1	Sècheresse forte	6	13.3	6	13.3	7	15.6
<-2	Sècheresse extrême						
<b>Totale</b>		<b>45</b>	<b>100</b>	<b>45</b>	<b>100</b>	<b>45</b>	<b>100.0</b>

### 5.1.2 Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles

Pour approfondir l'analyse statistique des données disponibles, les trois méthodes de détection des ruptures, citées précédemment, ont été successivement appliquées aux séries pluviométriques annuelles des stations choisies. Les figures 33 résument les résultats obtenus. Ces derniers montrent que l'hypothèse nulle, absence de rupture, est rejetée au niveau de la série de Guercif et de Belfarah. La significativité des ruptures est forte, testée au seuil de 0.001. Ces deux points de changement de tendance ont été apparus en 2000 et en 1994 au niveau des stations de Belfarah et de Guercif respectivement. Pour les données de la station de Berkine, qui se situe en amont, la présentation graphique de l'ellipse de contrôle de Buishand affiche qu'il y a un changement de tendance en 2003, sans qu'il soit statistiquement significatif (Fig. 33).

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

L'ensemble des ruptures coïncident avec la fin d'une période de sécheresse qu'a connu le Maroc vers la fin des années 1990, déterminée dans la majorité des études climatiques et hydrologiques antérieures.

Les ruptures détectées découpent nos séries en deux sous-périodes : de 1970 à 2000 et de 2000 jusqu'au 2015 pour les données de Belfarah. De la même manière, la série de Guercif a été séparée par la date de 1994.

En calculant les valeurs moyennes des deux sous séries, une augmentation des précipitations a été observée après les deux ruptures. Cet accroissement est estimé respectivement de 38 et 30 % au niveau de la station de Guercif et de Belfarh (Fig. 34).

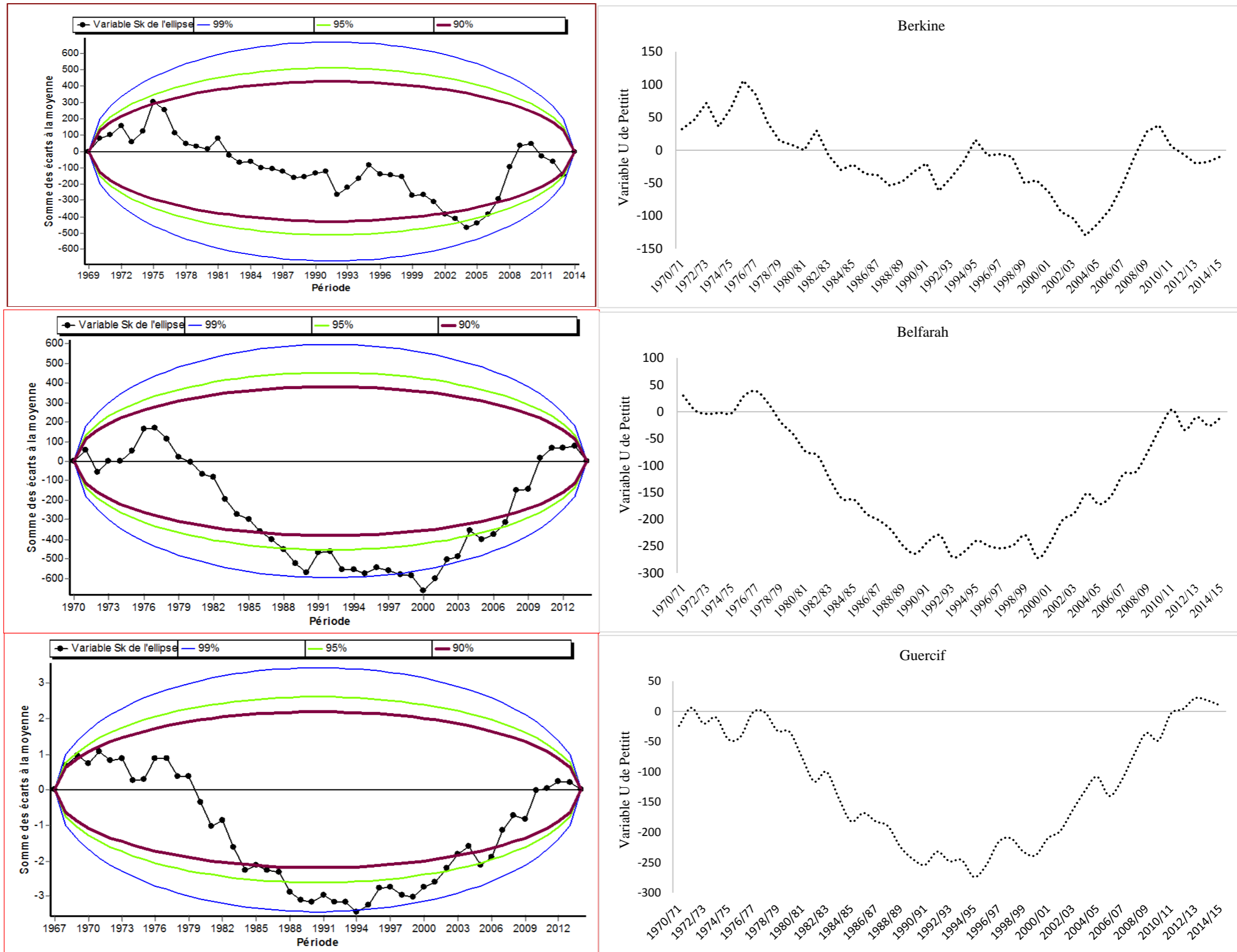
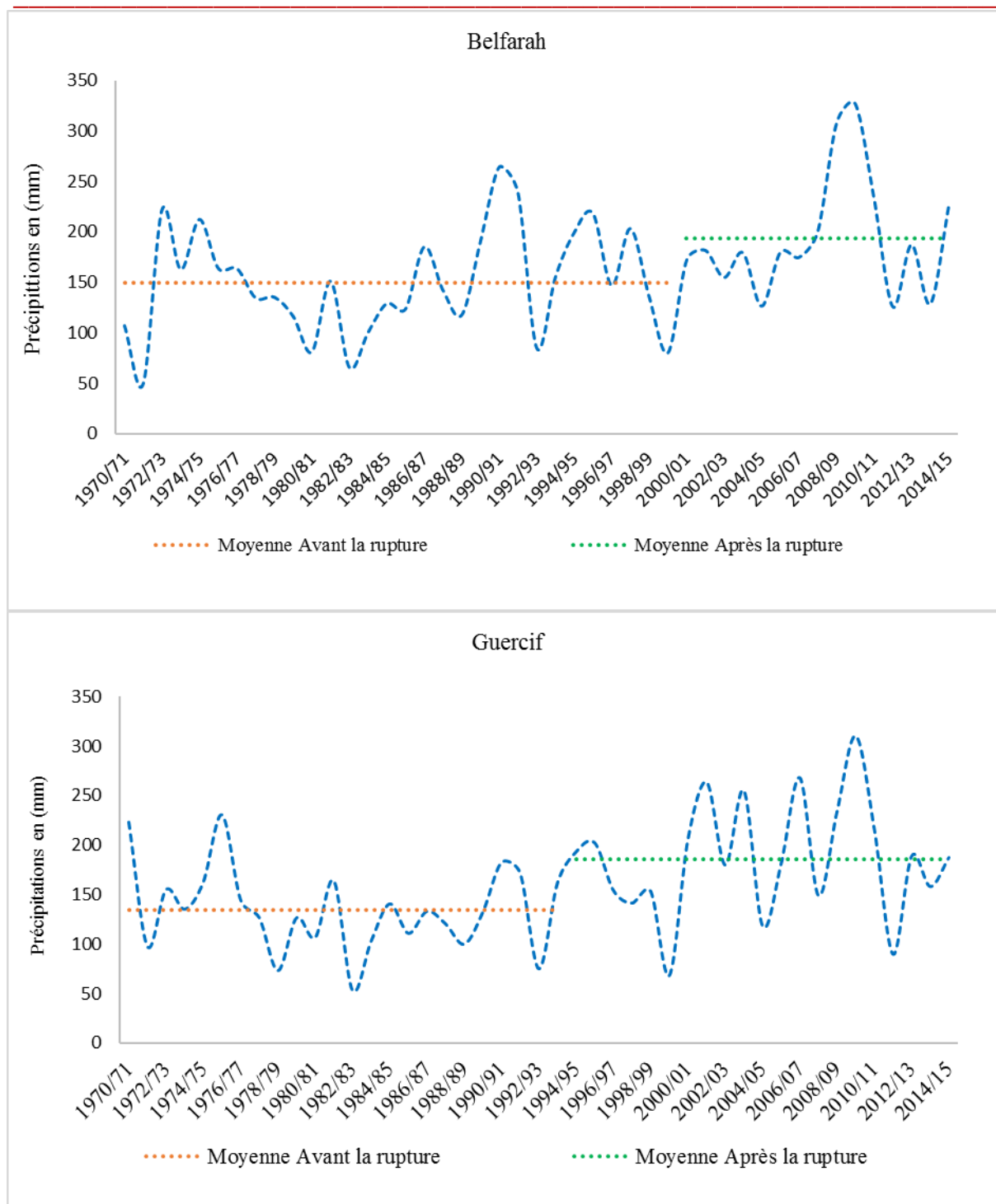


Figure 33 : Présentation graphique des résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux pluies annuelles des trois stations de la région d'étude



**Figure 34 : Moyenne des précipitations cumulées entre les deux périodes, avant et après la rupture, pour les données des stations de Belfrah et Guercif.**

### 5.1.3 Analyse des tendances des séries pluviométriques annuelles

Pour plus de précision dans l'étude de la variabilité pluviométrique au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou qui se situe dans sa majorité dans un milieu aride très vulnérable face aux changements climatiques, l'analyse des tendances pluviométriques a

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

une importance particulière. En effet, l'extraction de la tendance générale des précipitations peuvent être utilisés pour évaluer l'influence du système climatique sur le fonctionnement hydrologique (Onyutha et al., 2015). Cette étape est également essentielle pour des prévisions futures sur les changements climatiques probables et leurs impacts sur les ressources en eau et leurs variations (Yao et al., 2020).

Les résultats obtenus via le test classique de Mann-Kendall montrent une tendance généralisée à la hausse dans toutes les stations. Cette augmentation est significative au seuil de 0.05 au niveau des séries de Belfarah et de Guercif dont les valeurs Z calculées sont de 2.34 et 2.49 respectivement. Cependant, au niveau de la station de Berkine, la tendance vers l'augmentation reste statistiquement non significative.

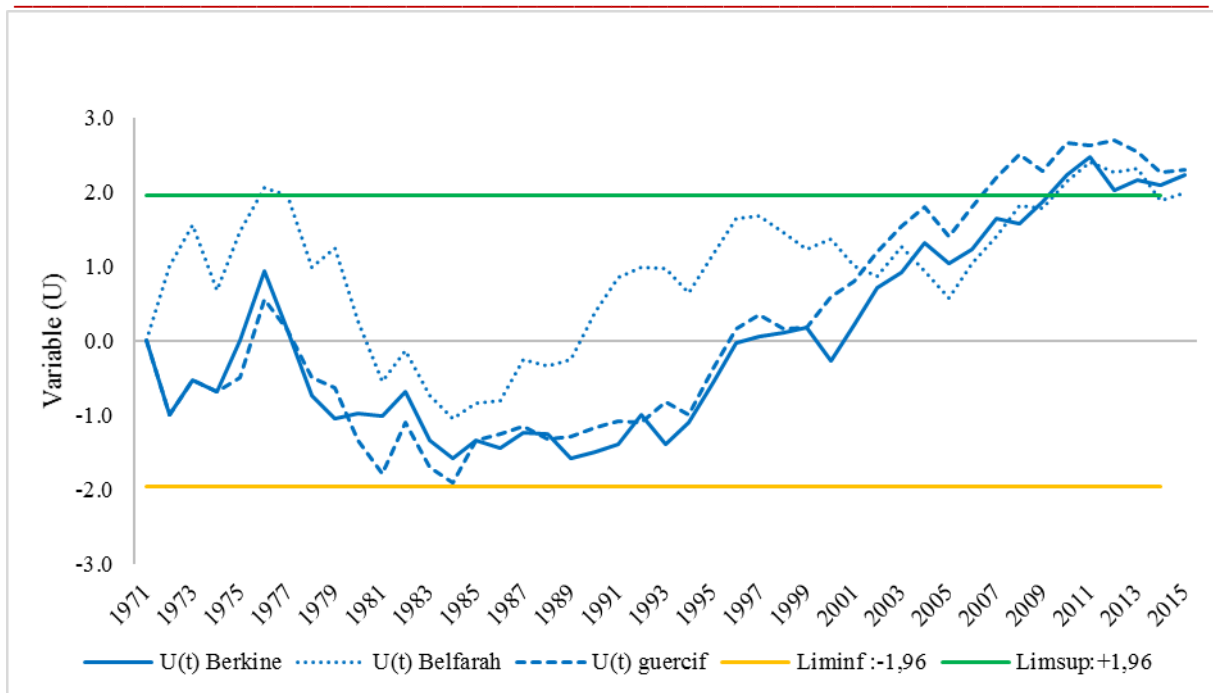
Si la statistique de tendance de Mann-Kendall indique la direction de la tendance, l'ampleur de cette dernière est exprimée en termes de pente, dont l'évaluation robuste est donnée par Sen (1968). Les valeurs obtenues (Tab. 29) affichent une importante augmentation des précipitations cumulées annuelles. Cette augmentation est estimée d'environ 1.7 mm/an à Belfarah et à Guercif. Cette évolution s'affaiblit en amont, elle est de 0.5 mm/an à Berkine

**Tableau 29 : Tendances des données pluviométriques annuelles au niveau des trois stations choisis**

	<i>La valeur Z de Mann Kendall</i>	<i>La pente de Sen</i>
<i>Berkine</i>	0.42	0.5
<i>Belfarah</i>	2.34 *	1.66
<i>Guercif</i>	2.49 *	1.68

En revanche, l'analyse des séries hydrométéorologiques à travers le test séquentiel de Mann-Kendall nous permet d'extraire les différentes sous tendances existent dans ces dernières et de détecter les ruptures. Ce qui nous intéresse dans cette étape est les sous tendances, puisque les ruptures ont été détectées par des tests antérieurs.

Les résultats obtenus présentent deux petites tendances remarquables. La première est vers la diminution, commencée en 1975, et la deuxième est vers l'augmentation observée depuis 1984 au niveau des stations utilisées. Cette dernière tendance dépasse le seuil de significativité de 0.05 en 2006 pour les données de Guercif, et en 2009 pour celles de Belfarah et de Berkine respectivement (Fig. 35).



**Figure 35 : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux pluies annuelles des trois stations de la région d'étude**

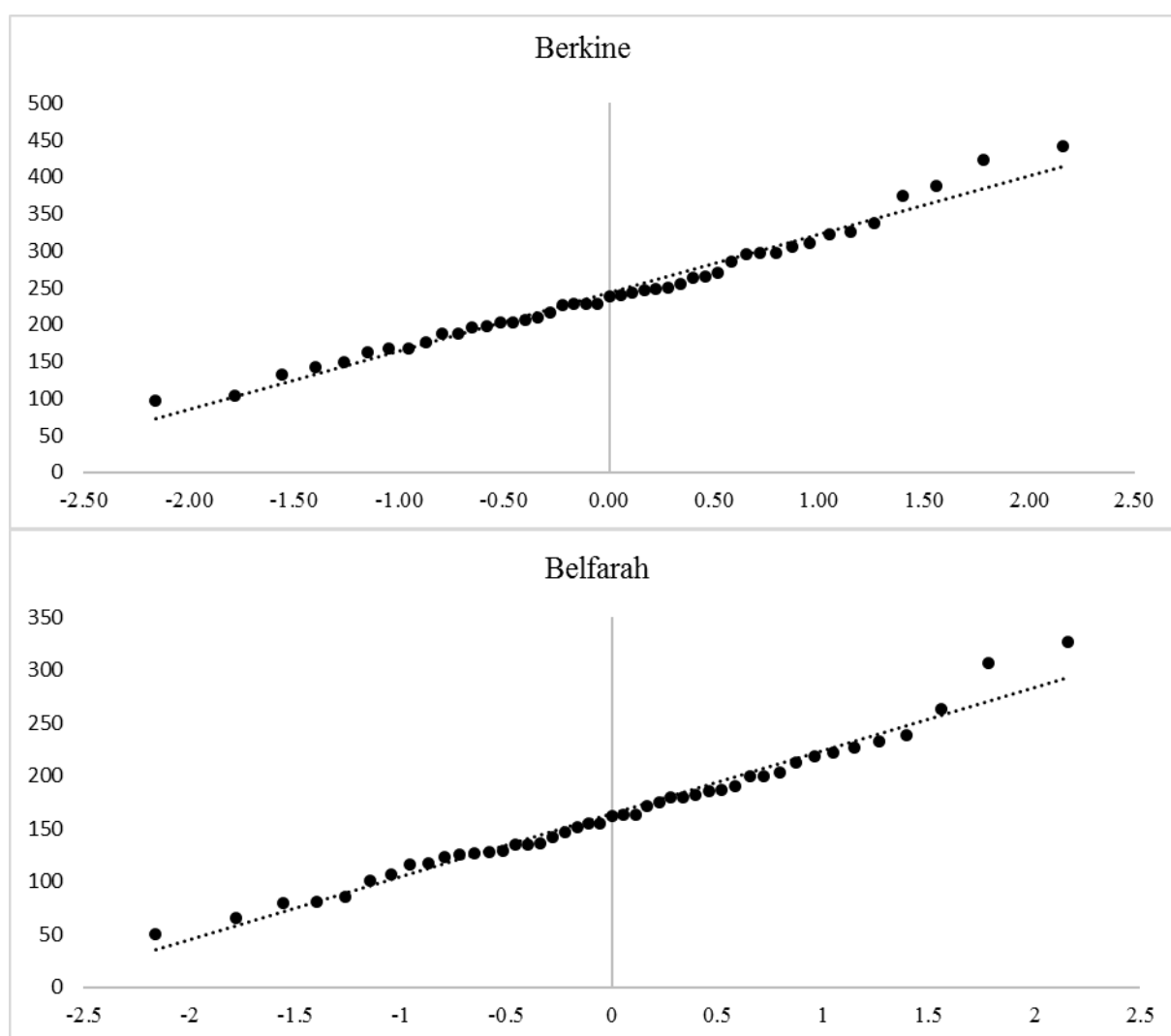
#### 5.1.4 Analyse fréquentielle des pluies annuelles

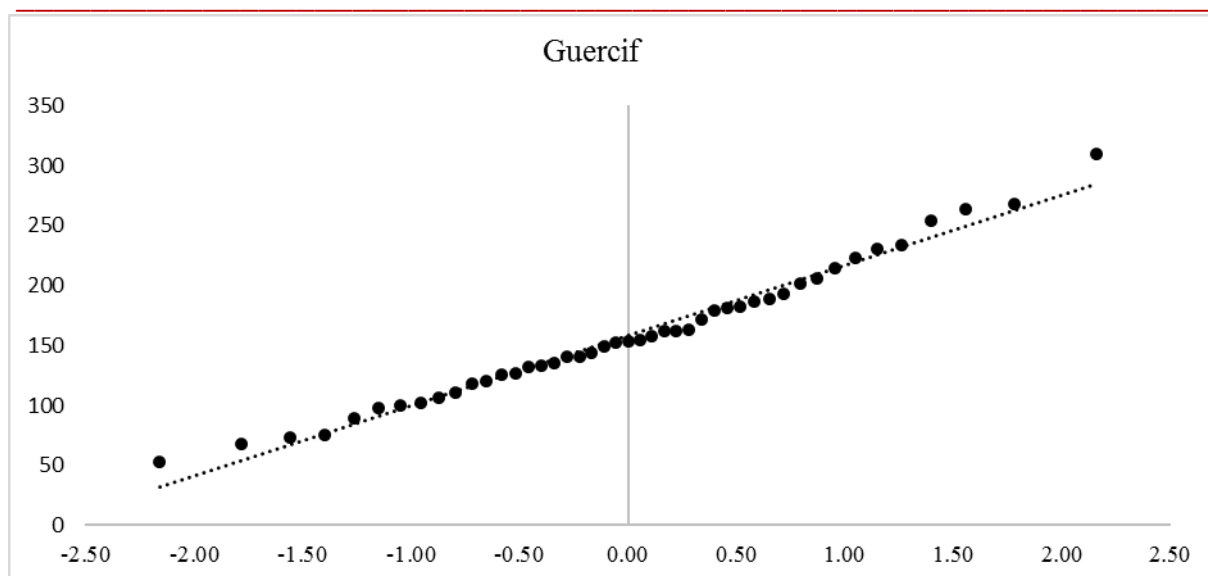
L'approche fréquentielle est une moyenne d'examiner la variabilité pluviométrique annuelle et d'analyser l'occurrence d'événements extrêmes ayant une portée probabiliste pour les événements futurs (Meylon et al., 2008 ; Giret, 2007). Ainsi, c'est une méthode de prédiction des valeurs de retours de la variable étudiées à une échelle de temps donnée. Elle est, par conséquent, importante pour chaque travail scientifique s'appuyant sur l'étude hydrologique d'un bassin versant.

Notre échantillon dispose de 45 valeurs de pluie annuelle de 1970 à 2015, auxquelles nous allons appliquer un ajustement à la loi normale. Après les avoir classées par ordre décroissant en donnant à chaque variable son rang, nous avons déterminé pour chaque valeur la fréquence empirique de dépassement,  $F = (r - 0.3) / (N + 0.4)$ , avec, r étant le rang de chaque valeur, et N est le nombre de données.

Le test d'adéquation de  $Kh^2$  constitue la meilleure méthode pour choisir la loi sur laquelle les données ont été bien ajustées. Pour nos séries, la loi normale donne le bon ajustement de données.

Les résultats issus de cette approche montrent que les moyennes de la période 1970 – 2015, calculées sur les données des trois stations, concordent aux valeurs estimées à une fréquence  $\frac{1}{2}$  (Fig. 36). Les fortes écarts entre les valeurs estimées pour la même fréquence, vers le sec et vers l'humide, sont un indicateur sur la grande variabilité temporelle (Tab. 30). L'écart de l'année sèche à la valeur centrale, pour les périodes de retours choisies, est beaucoup plus fort que l'écart en année excédentaire. Pour la période de retour centennale, vers le sec, les valeurs estimées sont au moins 6 fois inférieures à la moyenne interannuelle des séries. Tandis que, pour la même fréquence vers l'humide, les valeurs ne dépassent 2 fois la moyenne annuelle (Tab. 30). Par conséquent, la probabilité d'avoir des années extrêmement sèches dans notre zone d'étude, sont plus élevées. En revanche, la dispersion des valeurs par rapport à la droite d'ajustement pour les années humides nous permet de prévoir l'apparition des crues violentes.





**Figure 36 : Ajustement des précipitations annuelles des stations de Berkine, Belfarah et Guercif à la loi normale**

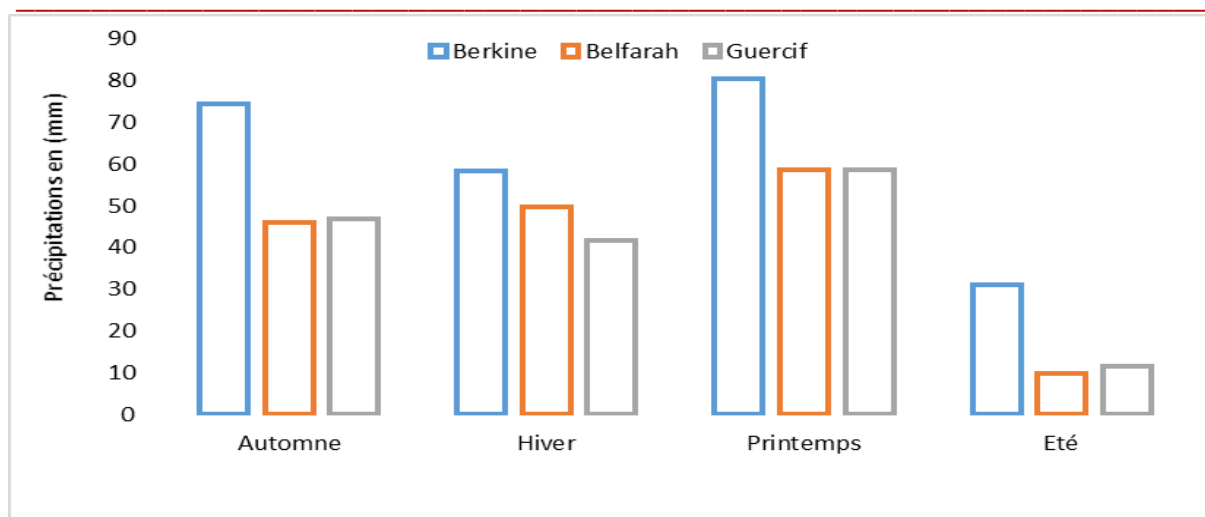
**Tableau 30 : Estimation des précipitations en fonction des périodes de retours choisis à base de la loi normale, appliqué au niveau des stations de Berkine, Belfarah et Guercif entre 1970 et 2015**

Fréquence	Vers le sec					1/2	Vers l'humide				
	1/100	1/50	1/20	1/10	1/5		1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
<b>Temps de retour</b>	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
<b>Pluie estimée Berkine</b>	63	84	116	144	178	243	308	342	370	402	424
<b>Pluie estimée Belfarah</b>	28	44	68	89	115	164	214	239	261	285	301
<b>Pluie estimée Guercif</b>	25	41	64	85	110	159	207	232	253	276	292

## 5.2 Variabilité saisonnière des précipitations

A l'échelle saisonnière, les valeurs les plus hautes des précipitations sont enregistrées en printemps, en automne et en hiver respectivement (Fig. 37). La saison estivale est relativement sèche et caractérisée par des précipitations surtout orageuses.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**



**Figure 37 : Précipitations moyennes saisonnières des trois stations**

### 5.2.1 Détection des ruptures au sein des séries saisonnières

La variabilité pluviométrique annuelle est influencée directement par la variabilité saisonnière. De ce point de vue et afin de déceler les différents changements liés à une non-stationnarité des données, les séries pluviométriques saisonnières ont été analysées à l'aide des tests de détection de ruptures. Les résultats de cette analyse montrent que les points de changement les plus significatifs ont été observés en automne. Les dates de ces ruptures sont : 1996, 1999 et 2000 au niveau des séries des stations de Berkine, Belfarah et Guercif respectivement (Tab. 31). Après ces ruptures, les moyennes saisonnières des précipitations augmentèrent de 34.1, 32.5 et 37 mm respectivement. Ainsi, ces ruptures sont statistiquement significatives au seuil de 0.01, selon les graphiques des méthodes statistiques de Buishand et de Pettitt.

**Tableau 31 : Différentes ruptures détectées dans les séries pluviométriques saisonnières**

Station	Saison	Date de rupture	Moyenne avant la rupture	Moyenne après la rupture	Rapport (Après - Avant)
<b>Berkine</b>	Automne	1996	61.6	95.7	<b>34.1</b>
	Eté	2006	25.6	50.9	<b>25.3</b>
	Printemps				
	Hiver				
<b>Belfarah</b>	Automne	1999	34	70	<b>32.5</b>
	Eté				
	Printemps				
	Hiver	1984	35.7	55.9	<b>20.2</b>
<b>Guercif</b>	Automne	2000	33.6	70.5	<b>36.9</b>
	Eté				
	Printemps				
	Hiver				

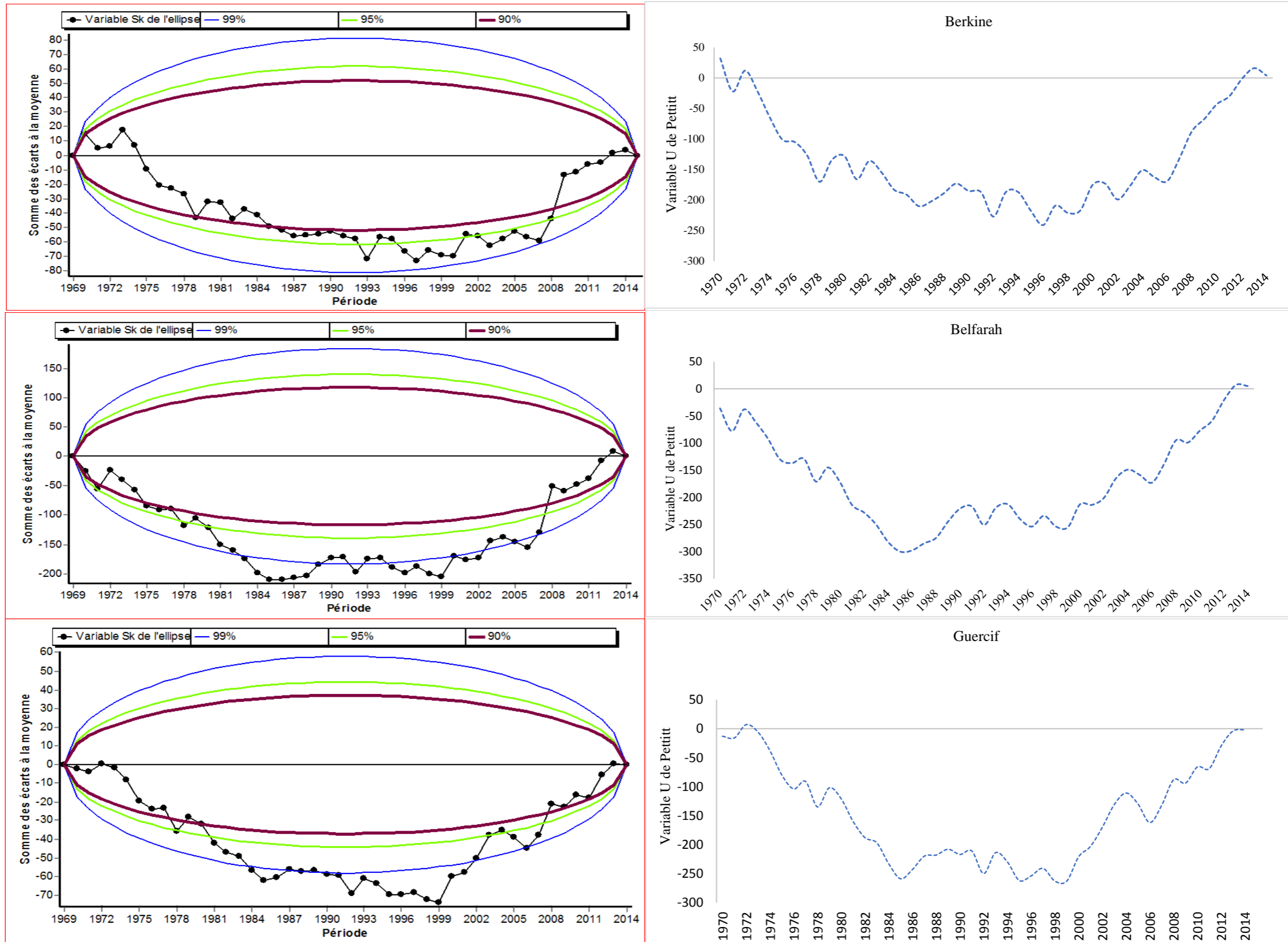


Figure 38 : Présentation graphique des résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux pluies automnales des trois stations de la région d'étude

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**5.2.2 Analyse des tendances saisonnières des précipitations**

L'analyse des tendances générales des précipitations saisonnières en utilisant le test classique de Mann-Kendall aborde une augmentation significative en automne au seuil de  $\alpha = 0.05$ . Alors que, les données pluviométriques de la saison printanière, la plus arrosée, ont affiché une tendance non significative vers la diminution (Tab. 32).

Les résultats obtenus en hiver et en été ne sont pas semblables pour les 3 stations. Pour la saison hivernale, une tendance vers l'augmentation non significative a été constatée au niveau des séries de Belfarah et Guercif, alors que le contraire pour les données de Berkine. Les précipitations estivales enregistrées au niveau des stations de Berkine et de Belfarah ont également augmenté (Tab. 32).

**Tableau 32 : Différentes tendances remarquées dans les séries pluviométriques saisonnières**

		Période	Valeur de Z	Significativité	Pente de Sen
<b>Berkine</b>	Automne	1970/2015	2.74	**	1.2
	Hiver	1970/2015	-0.62		-0.25
	Printemps	1970/2015	-1.59		-0.8
	Eté	1970/2015	1.83		0.5
<b>Belfarah</b>	Automne	1970/2015	3.50	***	1.18
	Hiver	1970/2015	1.56		0.5
	Printemps	1970/2015	-0.33		-0.13
	Eté	1970/2015	2.03	*	0.12
<b>Guercif</b>	Automne	1970/2015	2.88	**	0.95
	Hiver	1970/2015	1.15		0.24
	Printemps	1970/2015	-0.15		-0.06
	Eté	1970/2015	-0.14		

\*\*\* : Seuil de la signification de la tendance à 1 %. \*\* : Seuil de la signification de la tendance à 5 % \* : Seuil de la signification de la tendance à 10 %

Les courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall, tracées pour la saison d'automne commencent une tendance vers l'augmentation depuis 1985. Ces dernières dépassent le seuil de significativité ( $u=1.96$ ) vers le début des années 2000. Ainsi, une augmentation plus ou moins significative a été observée au niveau du graphique de l'hiver et de l'été. Tandis que les tracées U(t) du printemps ne présentent aucune tendance significative (Fig. 39).

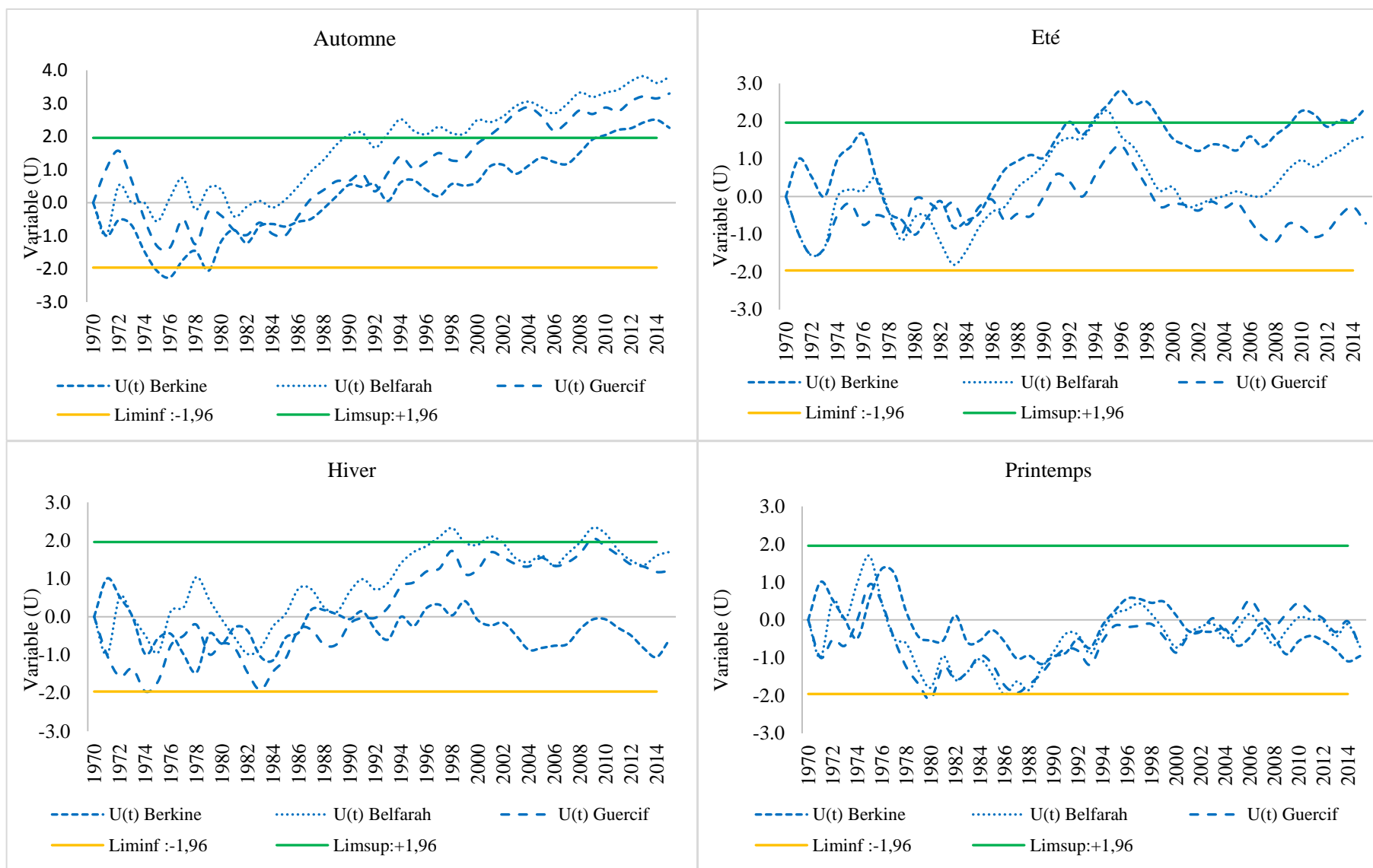


Figure 39 : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux pluies saisonnières des trois stations de la zone d'étude

### 5.3 Régime mensuel de la pluviométrie

Sur le bassin versant de l'Oued Melloulou, les précipitations surviennent surtout de septembre à mai. En moyenne, mars, avril et mai reçoivent les précipitations les plus abondantes : 27.9, 36.8 et 29.8 mm à la station de Berkine, 18.4, 24.1 et 14.9 mm à Belfarah, 20.3, 24, 17.2 mm à Guercif respectivement (Tab. 33). À l'opposé, juin, juillet et août sont les mois les plus secs. Avec une moyenne de 14.2, 8.7 et 11.15 mm à Berkine, 5.9, 1.2 et 4.1 à Belfarah, 6.7, 1.6 et 4 mm à Guercif respectivement (Fig. 40). Le mois d'avril est considéré comme le mois le plus arrosé au niveau de la zone d'étude.

Les écarts entre le minimum et le maximum des cumules mensuelles sont très importants. Toutes les valeurs minimales sont de 0 mm, alors que les valeurs maximales sont très élevées. Ces écarts des valeurs extrêmes peuvent donc perturber la tendance générale des séries étudiées (Tab.33).

Le coefficient de variation est fortement significatif au niveau de toutes les séries étudiées. Il dépasse 100% pour 10 mois à Berkine et Belfarah et pour 9 mois à Guercif (Tab. 33). Ce constat nous a permis d'apprécier le degré de la variabilité pluviométrique mensuelles et l'importance de la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne au niveau du bassin.

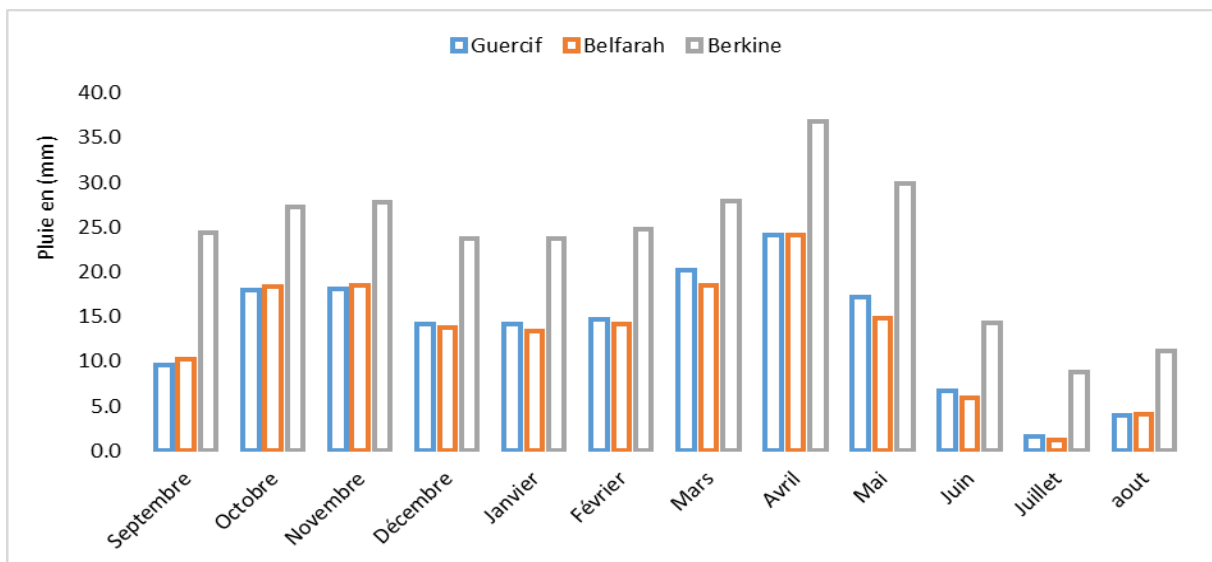


Figure 40 : Précipitations moyennes mensuelles des trois stations

**Tableau 33 : Variabilité mensuelle des précipitations des trois stations**

		Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
<b>Berkine</b>	<b>Moyenne</b>	21.4	26.7	26.3	15.5	20	22.9	23.4	31.6	25.2	10.9	8.7	11.5
	<b>Max</b>	129.1	149.7	156.9	47	74.9	142.7	88.6	143.5	137.5	47.4	50.2	88.7
	<b>Min</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>CV (%)</b>	113.7	124.5	107.4	81.8	104.9	119.9	84.8	109.7	108.2	110.8	122.7	150.7
<b>Belfarah</b>	<b>Moyenne</b>	8.92	18.9	18.26	14.58	17.46	17.6	19.4	24.03	15.3	5.70	0.79	3.32
	<b>Max</b>	59.2	120.3	82.3	61.4	104.8	68.1	66.9	104	55.9	39.3	7.8	40.7
	<b>Min</b>	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0
	<b>CV (%)</b>	157.4	121.5	115.2	101.6	116.5	96.7	77.2	110	102.5	171.8	247.5	230.3
<b>Guercif</b>	<b>Moyenne</b>	9.6	18	18	14.2	14	14.7	20.3	24	17	6.7	1.6	4
	<b>Max</b>	53.7	86.6	80.6	82.6	59.2	45.8	60.6	203	81.3	61.2	13.8	40.6
	<b>Min</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>CV (%)</b>	115.6	112	107.6	106.7	98.7	82.6	92.6	147.6	113.8	184.3	235.9	174.2

### 5.3.1 Analyse fréquentielle des précipitations mensuelles (régime pluviométrique probable)

L'analyse fréquentielle des régimes pluviométriques probables a été réalisée à la base des séries des cumules mensuels des précipitations. Cette étude a été établie aux fréquences de 10% (D1), de 25% (Q1), de 50% (Q2), de 75% (Q3) et de 90% (D9). Ce qui signifie une année très sèche, sèche, normale, humide et très humide respectivement. Les données mensuelles des précipitations ont été traitées sur une longue période de 1970/1971 jusqu'à 2014/2015.

- **Régime probable à la fréquence de 10% (D1)**

L'étude du régime probable pour une fréquence d'une année sur 10, considéré comme une année fortement sèche, montre une variation entre les deux stations situées en aval, Belfarah et Guercif, et celle située en amont, Berkine. Les deux premières séries présentent un régime unimodal avec un seul pic de non dépassement observé en mars, les valeurs estimées sont de 1.3 et 5 mm respectivement. Cependant, le régime est bimodal à Berkine avec deux maximums, en novembre et en février, estimés de 4 mm (Fig. 41).

- **Régime probable à la fréquence de 25%, 50% et 75% (Q1, Q2 et Q3)**

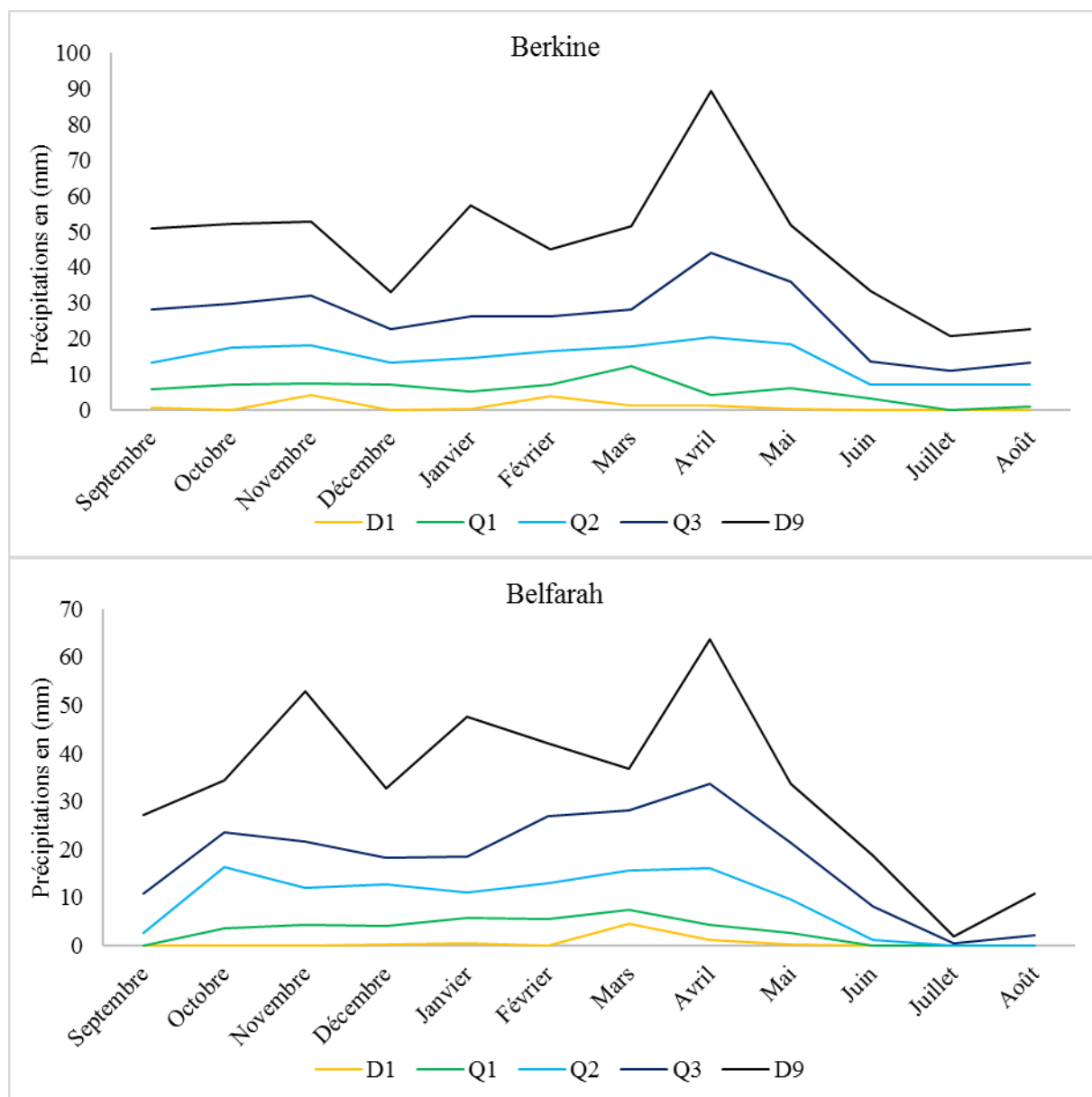
Pour la fréquence d'une année sur 4, une année sèche, les trois séries présentent un régime bimodal avec deux maximums ; le premier est automnal et le seconde est printanier. Ces deux pics ont été observés en novembre et mars pour les séries de Belfarah et de Berkine et en octobre et mars à Guercif. Les valeurs des précipitations estimées ne dépassent pas 7 mm

## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

Pour une année normale, avec une fréquence de 50%, les trois séries présentent également un régime bimodal en octobre et avril au niveau des stations de Belfarah et Guercif, et en novembre et avril à Berkine. La même allure de régime est observée à la fréquence de 75% (Fig. 41).

- **Régime probable à la fréquence de 90% (D9)**

Pour une année fortement humide, au seuil de 90%, le régime pluviométrique mensuel devient trimodal ; un maximum automnal en novembre, un hivernal en janvier et un troisième est printanier en avril (Fig. 41).



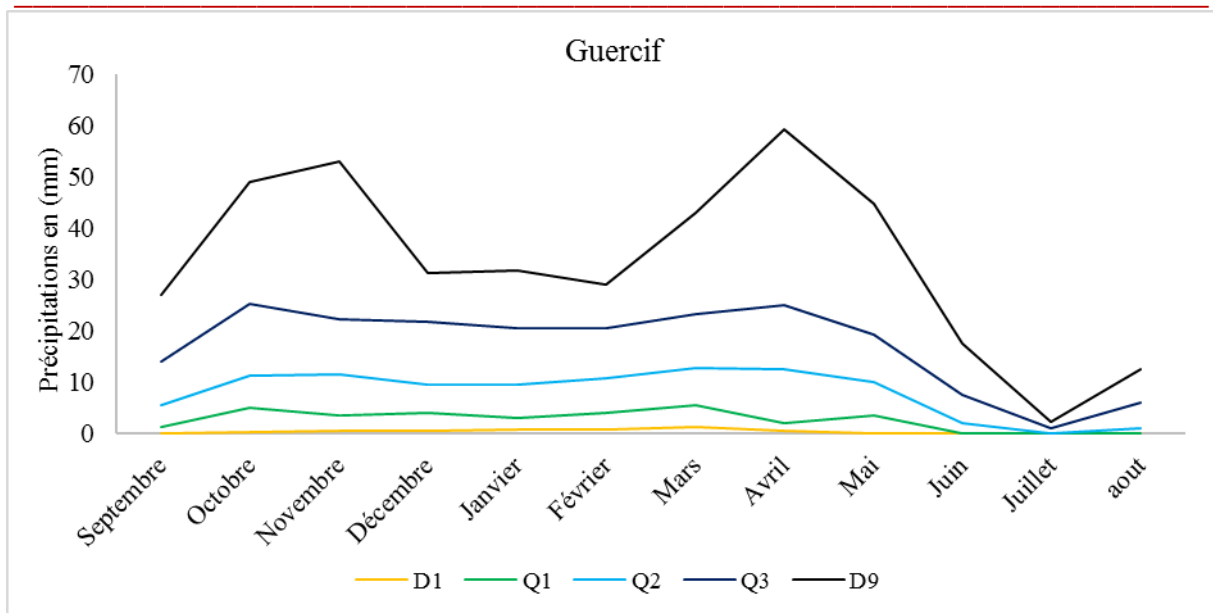


Figure 41 : Résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations mensuelles au niveau des trois stations

### 5.3.2 Détection de ruptures au sein des séries de données mensuelles

Comme nous avons cité précédemment, les principales ruptures significatives sont détectées au niveau des séries pluviométriques automnales. En effet, le tableau 34 révèle que les séries des mois de septembre, octobre et novembre enregistrent les points de changement de tendance les plus significatifs. Ces derniers ont été observés en 1988 et 1997 à Berkine, et en 1988 et 1999 à Belfarah respectivement. Alors que, les séries mensuelles de Guercif ne présentent qu'une seule rupture en 1998 située au niveau des données de novembre.

Les moyennes mensuelles calculées après les ruptures sont strictement supérieures à celles d'avant (Tab. 34). A titre d'exemple, au niveau de la série de novembre la moyenne enregistrée à Belfarah est de 12 mm entre 1970 et 1999, alors qu'elle est de 29 mm entre 1999 et 2015.

Il convient de noter également qu'il y a une rupture en 1996 pour le mois d'avril à Berkine. Un déficit pluviométrique de -17 mm est observé après ce point.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**Tableau 34 : Ruptures détectées dans les séries pluviométriques mensuelles**

	<i>Berkine</i>			<i>Belfarah</i>			<i>Guercif</i>		
	<i>Rupture</i>	<i>Moyenne avant</i>	<i>Moyenne après</i>	<i>Rupture</i>	<i>Moyenne avant</i>	<i>Moyenne après</i>	<i>Rupture</i>	<i>Moyenne avant</i>	<i>Moyenne après</i>
<i>Septembre</i>	1988	12	29	1988	5	12	AR		
<i>Octobre</i>	1997	18	39	1999	13	31	AR		
<i>Novembre</i>	AR			1999	13	29	1998	12	29
<i>Décembre</i>	1979	7	18	1989	9	19	AR		
<i>Janvier</i>	AR			AR			AR		
<i>Février</i>	AR			AR			AR		
<i>Mars</i>	AR			AR			AR		
<i>Avril</i>	1996	39	22	AR			AR		
<i>Mai</i>	AR			AR			AR		
<i>Juin</i>	AR			AR			AR		
<i>Juillet</i>	AR			AR			AR		
<i>Août</i>	1984	6	16	AR			AR		

AR ; absence de rupture

### 5.3.3 Tendance générale des séries pluviométriques mensuelles

Le tableau 31 montre une variation de tendances pluviométrique d'un mois à un autre et d'une station à une autre. Pour cette raison, nous avons réalisé une analyse station par station et mois par mois :

- **Au niveau de la station de Berkine :** Les tendances positives les plus significatives sont détectées au niveau des séries des mois d'août et de septembre. On peut ajouter la série d'octobre par ce qu'elle présente une valeur Z proche du seuil de 1.97. Seulement la série d'avril présente une tendance non significative vers la diminution (Tab. 35).

- **Au niveau de la station de Belfarah :** les séries qui présentent une tendance positive et significative sont celles de septembre et novembre. On peut ajouter aussi la série d'octobre. Tandis que la série du mois d'avril présente une tendance vers la diminution avec une valeur de Z négative estimée de -1.49 (Tab. 35).

- **Au niveau de la station de Guercif :** La seule tendance positive, statistiquement significative, est observée en novembre. Aussi, il semble qu'il y a une importante évolution positive des précipitations, sans qu'il soit significative, en janvier, septembre et octobre. Le seul mois qui présente une diminution avec le temps est celui d'avril, mais toujours sans qu'elle soit significative (Tab. 35).

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**Tableau 35 : Différentes tendances remarquées dans les séries pluviométriques mensuelles**

	<i>Berkine</i>			<i>Belfarah</i>			<i>Guercif</i>		
	Valeur de Z	Significativité	Pente de Sen	Valeur de Z	Significativité	Pente de Sen	Valeur de Z	Significativité	Pente de Sen
<i>Janvier</i>	0.30		0.05	1.56		0.18	1.92		0.22
<i>Février</i>	-1.39		-0.22	0.41		0.06	0.37		0.02
<i>Mars</i>	-0.74		-0.12	1.42		0.26	0.50		0.07
<i>Avril</i>	-2.59	**	-0.63	-1.49		-0.24	-0.53		-0.08
<i>Mai</i>	0.27		0.04	-0.13		0	0.59		0.06
<i>Juin</i>	-0.30		-0.3			0			-0.01
<i>Juillet</i>	1.67		0.07			0			0
<i>Août</i>	3.01	**	0.2			0			0
<i>Septembre</i>	2.67	**	0.5	2.66	**	0.6	1.45		0.13
<i>Octobre</i>	1.89		0.3	1.90		0.34	1.23		0.21
<i>Novembre</i>	0.61		0.1	2.70	**	0.7	2.37	*	0.3
<i>Décembre</i>	1.30		0.17	1.82		0.18	0.23		0.04

\*\*\* : Seuil de signification de la tendance à 1 %. \*\* : Seuil de signification de la tendance à 5 % \* : Seuil de signification de la tendance à 10 %

Le test séquentiel de Mann-Kendall est appliqué seulement sur les séries de données des mois qui présentent une tendance significative ou très proches d'être significatives. Il s'agit des séries de septembre, octobre, novembre au niveau des trois stations. Ainsi, ce test est appliqué sur les données d'avril, car ce mois présente une tendance vers la diminution pour les trois stations malgré la non significativité observé au niveau des séries de Belfarah et de Guercif.

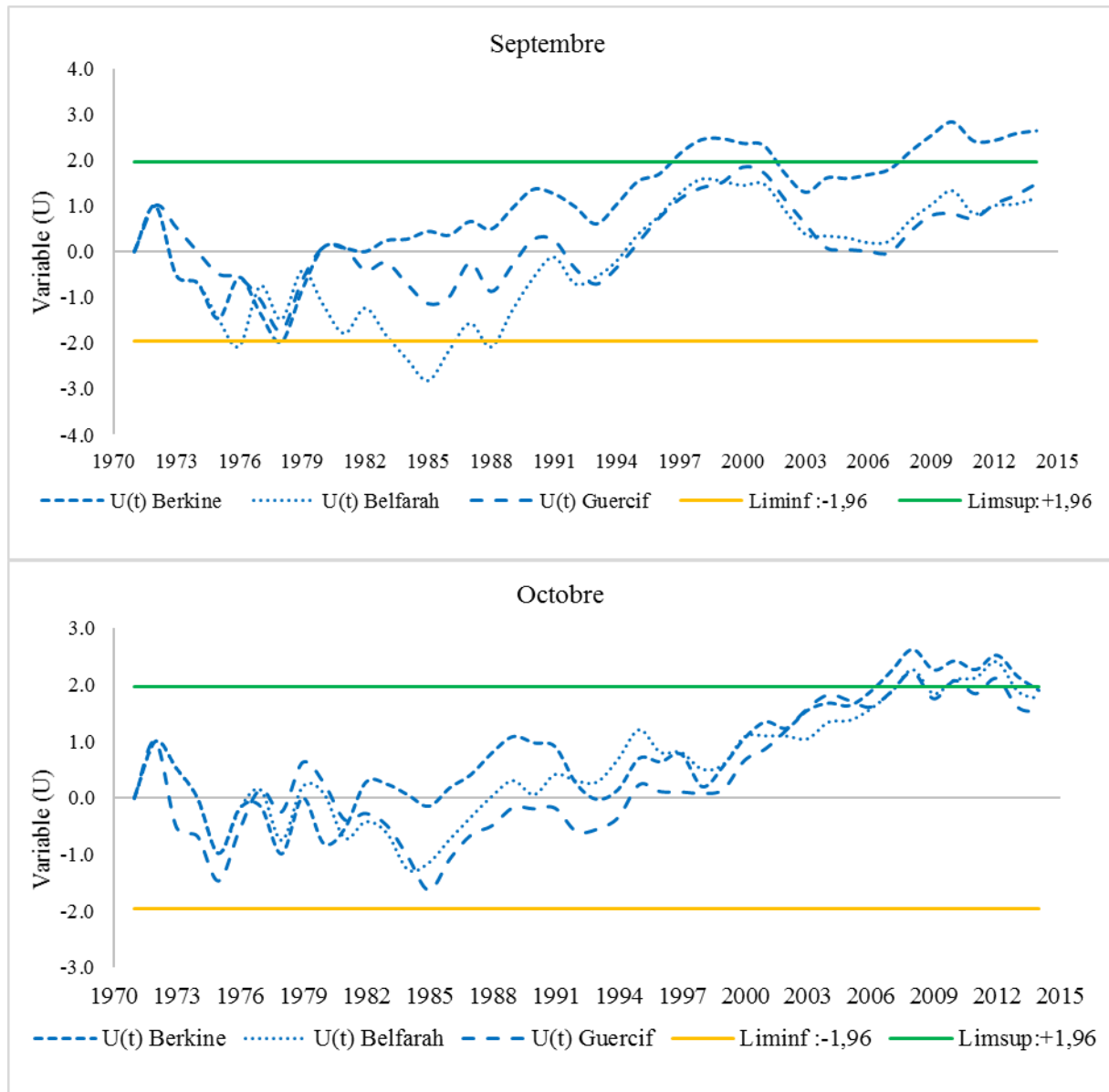
D'une manière générale, les tracés de la variable U(t) de chaque mois ont la même allure d'évolution dans le temps. Ce constat est un bon indicateur sur l'homogénéité et la qualité des données utilisées. Cependant, la significativité des tendances signalées varie d'une série à une autre.

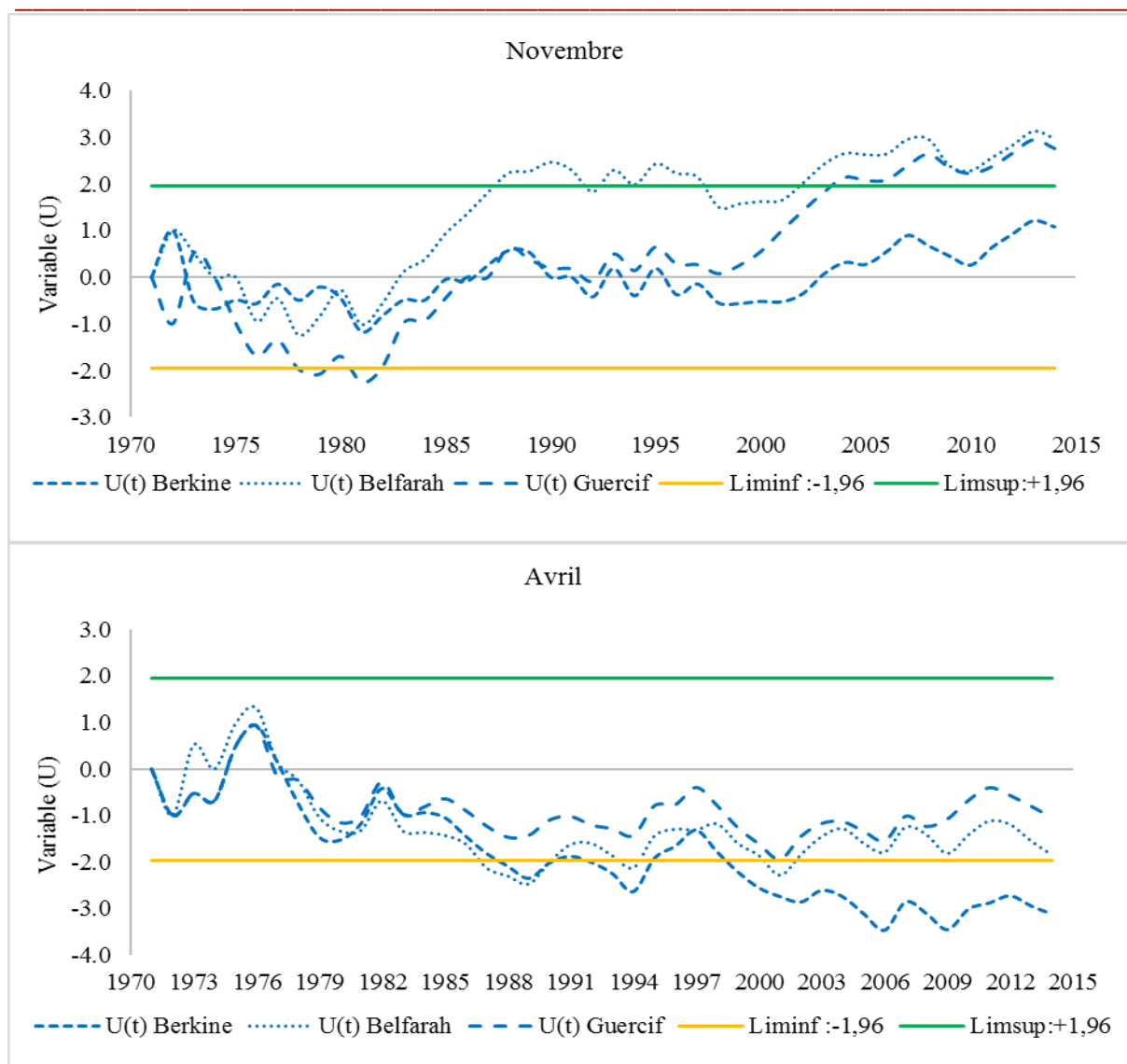
- **Pour les séries du mois de septembre** : une augmentation des valeurs cumulées des précipitations a commencé en 1984-1985, elle devient significative de 1997 à 2002 et de 2005 jusqu'à 2015. Cette tendance significative est observée au niveau de la série de Berkine seulement (Fig. 42).

- **Pour les séries du mois d'octobre** : la tendance vers le haussement a été commencée en 1985-1986 et elle devienne significative en 2005 - 2006 pour les 3 séries (Fig. 42).

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

• Pour les séries du mois de novembre : les tendances vers l'augmentation les plus significatives sont observées en aval. Cette évolution a commencé en 1988 à Belfarah et en 2004 à Guercif. Par contre, toutes les courbes  $U(t)$  du mois d'avril ont une tendance vers la diminution. Cette dernière a touché plus la partie amont (Fig. 42).





**Figure 42 : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux séries pluviométriques des mois de Septembre, Octobre, Novembre et avril des trois stations de la zone d'étude**

#### 5.4 Résultats issus des données pluviométriques journalières

A base des données pluviométriques journalières, les tendances pluviométriques calculées à travers le logiciel RClindex sont collectées dans le tableau 36. La significativité des tendances a été évaluée à un niveau de 5% ( $\alpha = 0.05$ ) en utilisant le test de P-value pour les tendances annuelles et le test classique de Mann-Kendall pour les tendances mensuelles.

Les résultats obtenus à l'échelle annuelle montrent que les indices pluviométriques qui présentent une tendance significative sont ceux de l'intensité des pluies *SDII*, du nombre de jours des fortes précipitations (*R20*, *R10* et *R95p*), des précipitations cumulées *PRCTOT* et des

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

séquences humides  $RX5j$ ,  $RX3j$ . Les tendances de ces derniers indices tous sont vers l'augmentation (Tab. 36).

**Tableau 36 : Indices liés aux précipitations calculées par le logiciel RCLimdex qui présentent une tendance significative à l'échelle annuelle**

Indice	P-value	Tendance	Degré de significativité
Précipitations totales PRCTOT	0.001	<b>Positive</b>	Très fortement significativité
Indice simple d'intensité journalière SDII	0.022	<b>Positive</b>	Fortement significativité
Nombre des jours de précipitations élevées R10	0.008	<b>Positive</b>	Très fortement significativité
Nombre des jours de précipitations très élevées R20	0.019	<b>Positive</b>	Fortement significativité
Précipitations très humides avec R95p	0.017	<b>Positive</b>	Fortement significativité
Maximum de 5 jours de précipitations RX5j	0.031	<b>Positive</b>	Fortement significativité
Maximum de 3 jours de précipitations RX3j	0.026	<b>Positive</b>	Fortement significativité
Maximum d'une journée de précipitations RX1j	0.087	<b>Positive</b>	Significative

A l'échelle mensuelle, les résultats montrent une augmentation des tendances pluviométriques cumulées mensuelles pour tous les mois, sauf ceux de juin et juillet. La tendance la plus significative est observée en octobre. La série de ce dernier mois présente également une tendance significative vers l'augmentation des valeurs maximales de pluies enregistrées pendant 3 jours et 5 jours de précipitations  $rx3j$  et  $rx5j$ . Alors que la série de juillet présente une diminution significative de cet indice. (Tab 37). La longueur la plus élevée d'une séquence humide consécutive (cwd) a été observée en novembre, elle est de 5 jours.

**Tableau 37 : Indices liés aux précipitations calculées par le logiciel RCLimdex qui présentent une tendance significative à l'échelle mensuelle**

	rx1day	rx3day	rx5day	cwd
<b>Janvier</b>	0.918	0.850	0.986	-0.059
<b>Février</b>	1.651	1.547	1.566	0.575
<b>Mars</b>	0.238	0.629	0.629	-1.133
<b>Avril</b>	0.000	-0.425	0.136	0.124
<b>Mai</b>	0.204	0.442	0.476	-0.537
<b>Juin</b>	-0.824	-0.885	-0.665	-0.524
<b>Juillet</b>	-2.492	-2.075	-1.960	-1.828
<b>Août</b>	0.054	0.242	0.087	0.487
<b>Septembre</b>	0.393	0.783	0.700	-0.241
<b>Octobre</b>	2.432	2.363	2.449	1.651
<b>Novembre</b>	1.225	0.867	0.782	-0.072
<b>Décembre</b>	0.119	0.544	1.037	1.680

### 5.5 Analyse des pluies journalières maximales

Vu sa situation géographique, la majorité des pluies que reçoit le bassin versant de l'Oued Melloulou sont d'origine convective et de forte intensité, ce qui provoque souvent des crues violentes. Dans cette optique, l'analyse statistique des événements pluviométriques extrêmes (PJmax) est une étape primordiale pour comprendre la dynamique actuelle de l'Oued Melloulou. Malheureusement les données instantanées de la station de Berkine,

amont, ne sont pas disponibles. Pour cette raison, on va s'appuyer seulement sur les données collectées à Belfarah et à Guercif entre 1970 et 2015.

L'analyse de ces données extrêmes indique une présence de rupture significative au niveau de la station de Guercif. Cette rupture, détectée est en 1993, avec un seuil de significativité très élevé ( $\alpha = 0.001$ ) (Fig. 43). Il semble également qu'il y a un point de changement en 1999 au sein de la série de Belfarah avec une significativité moins élevée ( $\alpha = 0.005$ ) par rapport à celle de Guercif.

Comme le montre la présentation graphique de Buishand, une augmentation des valeurs des Pjmax a été observée après les dates de ruptures signalées plus haut. En effet, les moyennes des Pjmax, calculées avant les ruptures, sont de 19 et 23 mm à Guercif et à Belfarah respectivement (Fig. 45 et 46). Ces valeurs ont été dépassées après ; elles sont de 29 et 30 mm pour Guercif et Belfarah respectivement.

L'application du test classique de Mann-Kendall montre une tendance généralisée à la hausse des Pjmax. Cette tendance est statistiquement significative au niveau de la série des données relatives à la station de Guercif avec un  $Z = 2.35$ . Par contre, la valeur de  $Z$  calculée au niveau de la station de Belfarah est de 1.12, est inférieure au seuil de significativité de 5%. Pour visualiser les sous-tendances dans les séries chronologiques des Pjmax, le test séquentiel de Maan Kendall a été appliqué. Les résultats obtenus de cette analyse statistique affichent une courte tendance vers les faibles valeurs qui s'étale entre 1972 et 1985 à Belfarah. Après, une augmentation progressive a été constatée sans qu'elle soit pour autant significative (Fig. 48).

Pour la station de Guercif, la variable réduite  $u(t)$  a atteint des valeurs significativement hautes, dépassant la limite de confiance de +1.96, de l'année 2005 à 2015. Ceci correspond à une tendance significative à l'augmentation. Cette tendance a commencé en 1986. Également, une tendance non significative, à la diminution a été constatée entre 1978 et 1986 (Fig. 47).

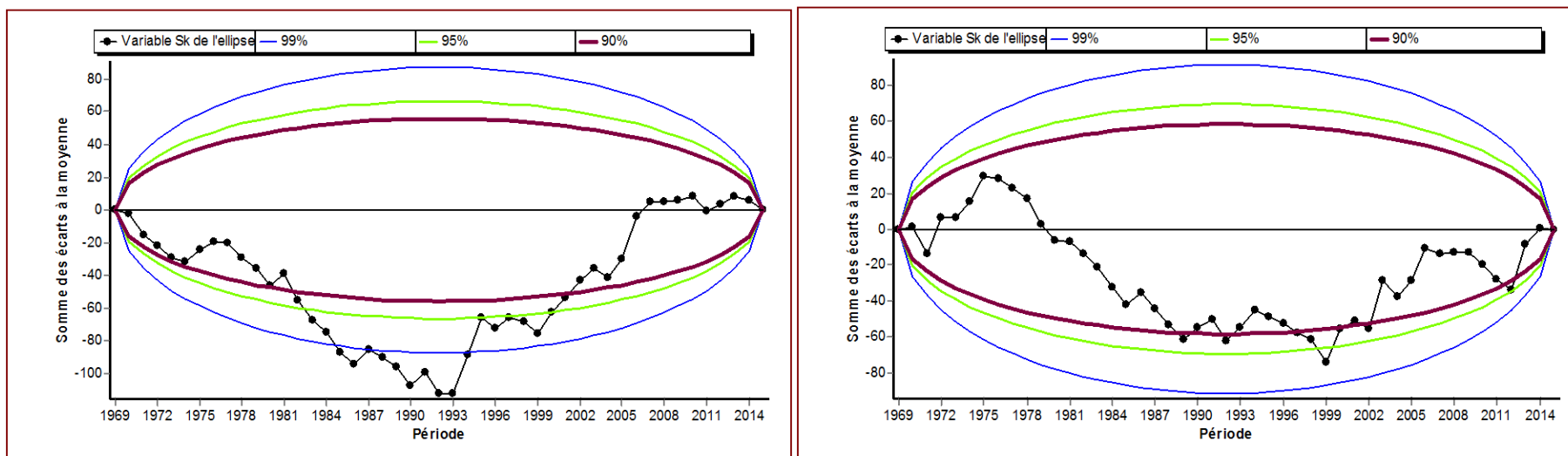


Figure 43 et 44 : Représentation graphique du test de Buishand appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Guercif et de Belfarah

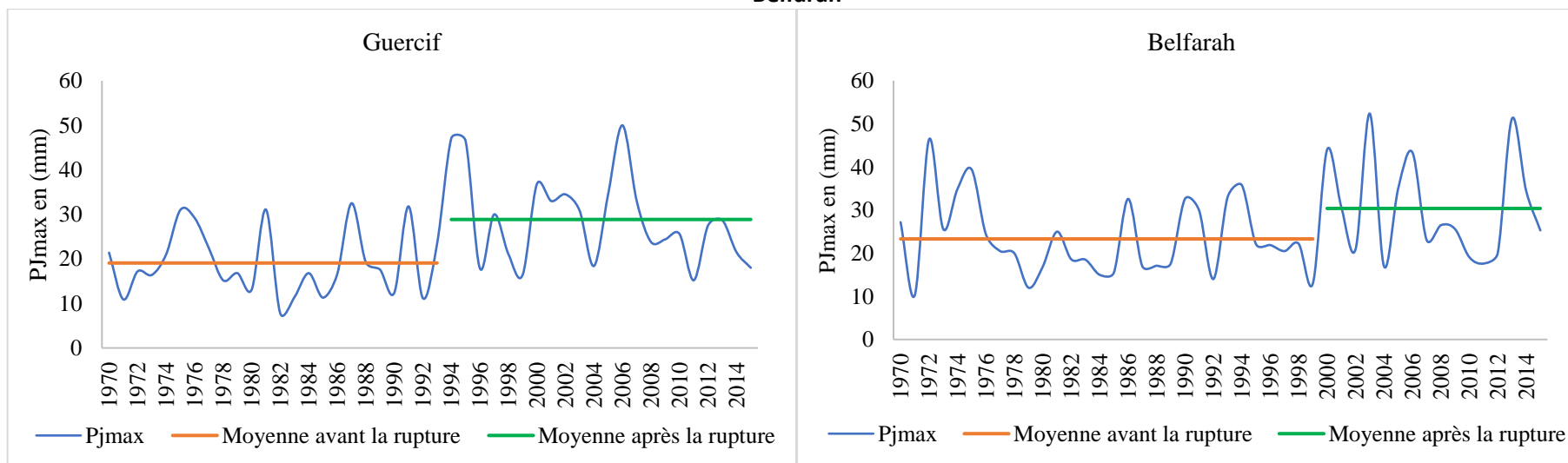


Figure 45 et 46 : Moyennes des pluies journalières maximales avant et après la rupture, calculées au niveau de la station de Guercif et de Belfarah

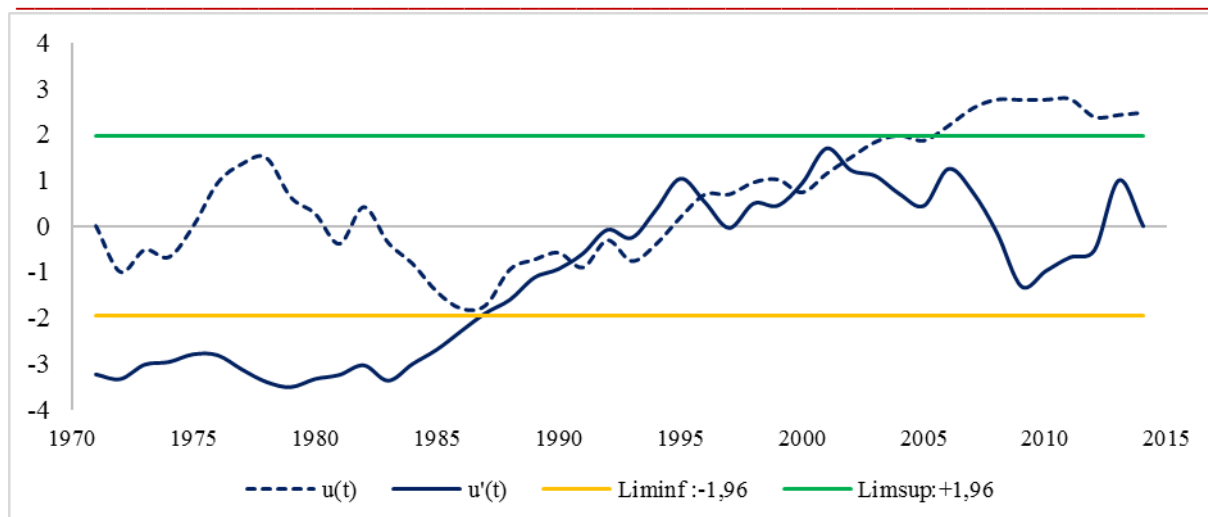


Figure 47 : Tracés du test séquentiel de Maan Kendall appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Guercif

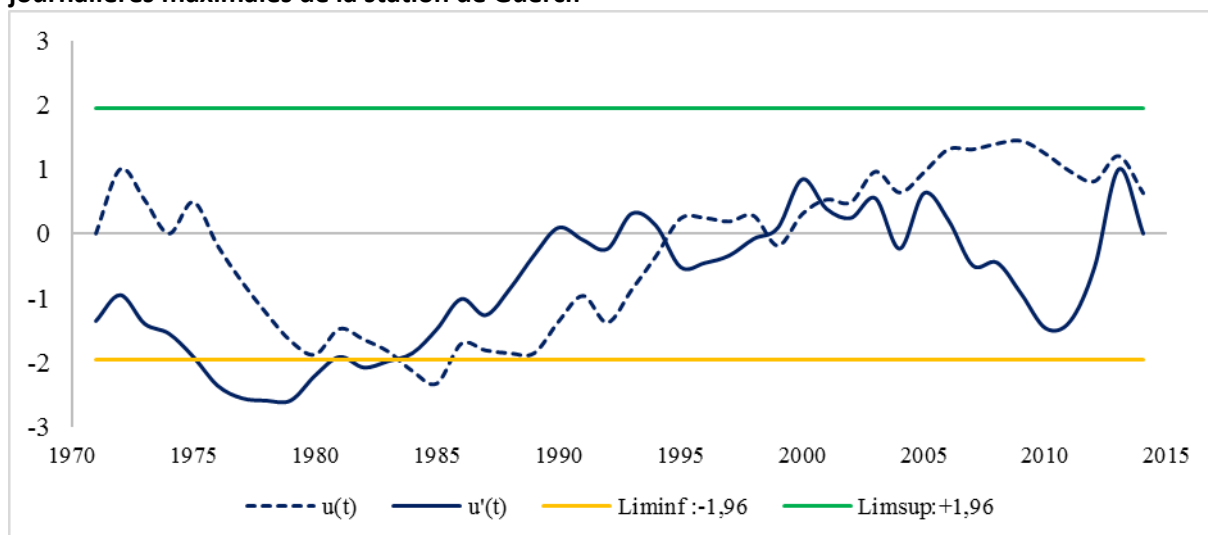
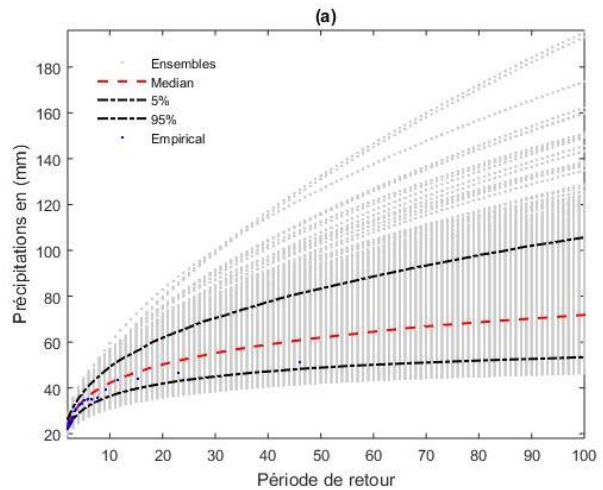


Figure 48 : Tracés du test séquentiel de Maan Kendall appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Belfarah

Comme nous avons cité en haut, la série de Guercif présente une tendance significative vers l'augmentation. Cela signifie que cette série est non-stationnaire, alors qu'au niveau de la station de Belfarah les données sont stationnaires ; aucune tendance significative n'a été détectée, en dépit d'une valeur Z positive égale 1.12.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Sous l'hypothèse stationnaire, les PJmax estimées au niveau de la station de Guercif sont inférieures à ceux de Belfarah. Pour un niveau centennal, les niveaux de retour calculé sont de 56 et 72 mm respectivement. Aussi, la valeur centennale estimée à Guercif peut atteindre 78 mm par jours sous l'hypothèse non stationnaire basé sur 95% des paramètres échantillonnés, à faible risque (Low Risk) (Tab. 38). Ces valeurs peuvent engendrer des crues violentes qui peuvent causer des conséquences néfastes



**Figure 49 : Niveaux de retour des pluies journalières maximales selon la période de retour à Belfarah sous l'hypothèse de stationnarité (a) (1970-2015).**

sur les cultures en irrigué des basses terrasses de l'Oued Melloulou.

**Tableau 38 : Fréquence de retour probables estimées des pluies journalières maximales en (mm/jour) selon les différentes hypothèses au niveau des deux stations pluviométriques choisies.**

Station	Temps de retour en (Année)	10	20	50	70	100
		L'hypothèse				
Station de Guercif	Stationnaire	38	44	51	53	56
	Non stationnaire	37	41	47	49	52
	Non stationnaire basé sur la médiane des paramètres échantillonnés	52	57	63	65	68
	Non stationnaire basé sur 95% des paramètres échantillonnés, à faible risque (Low Risk)	62	67	73	75	78
Station de Belfarah	Stationnaire	42	50	63	66	72

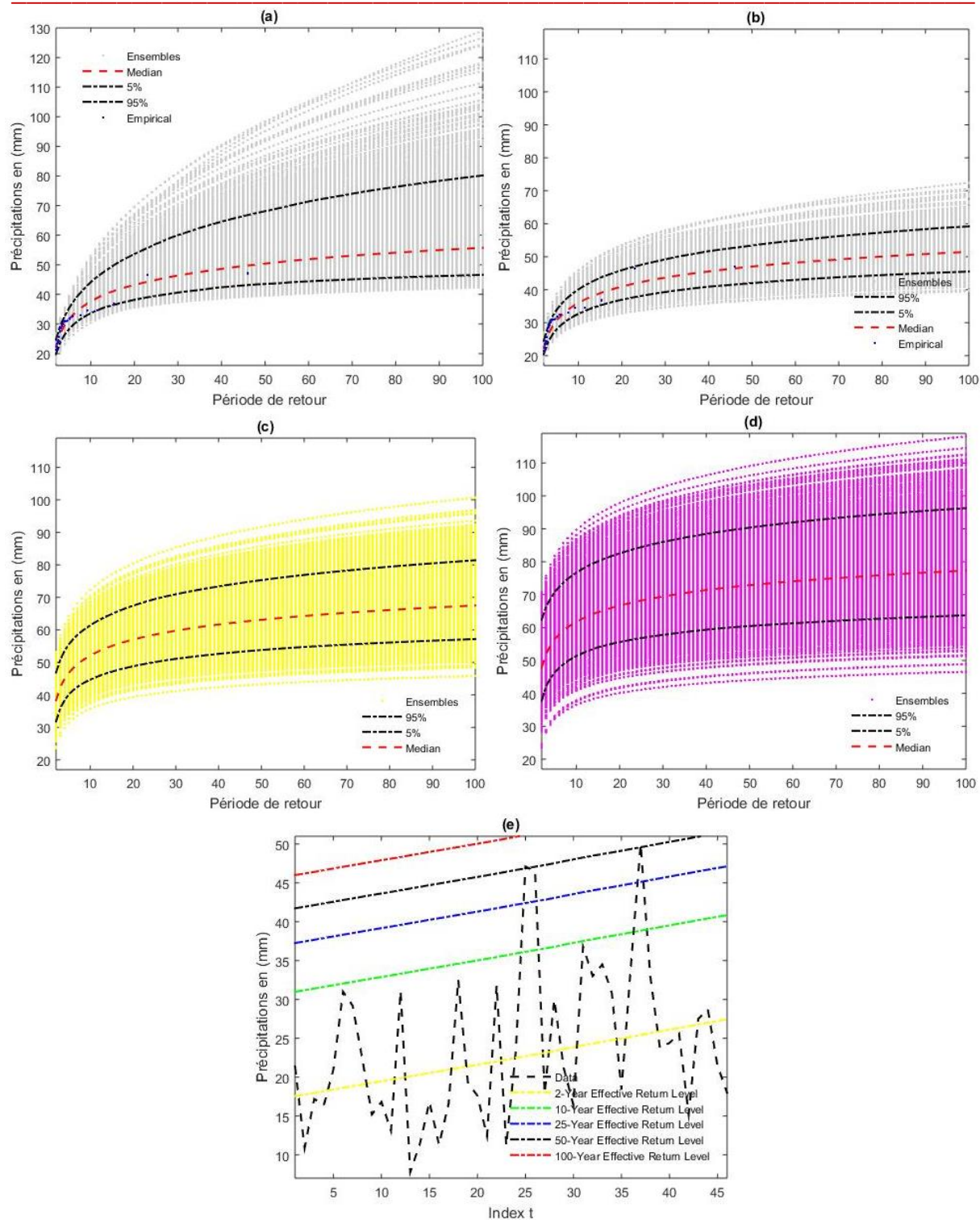


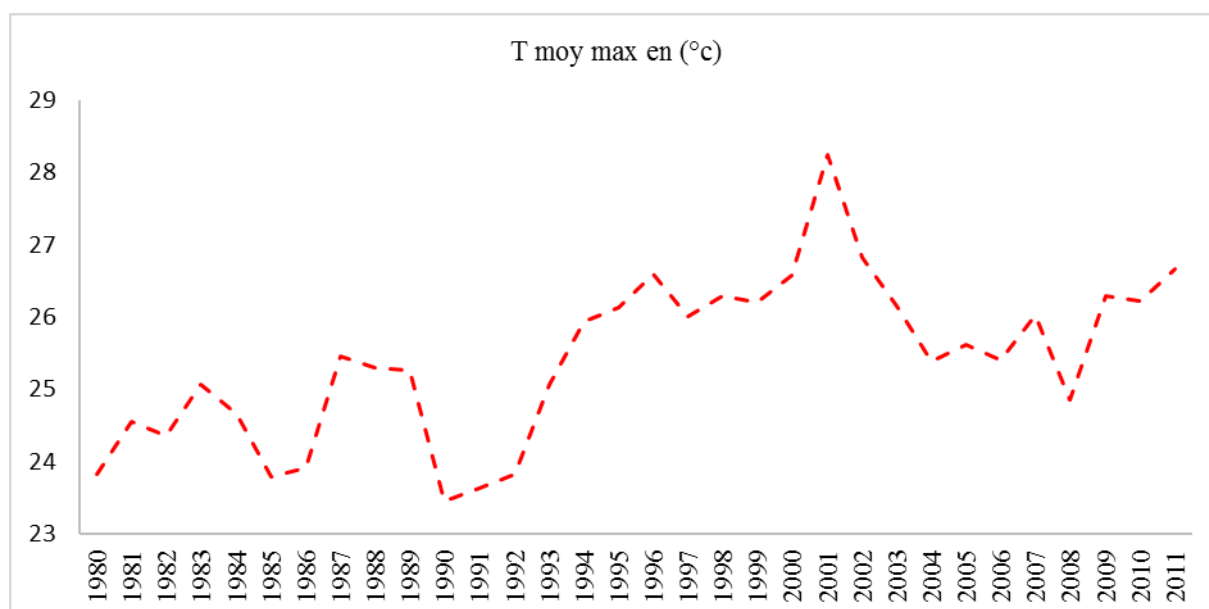
Figure 50 : Niveaux de retour des pluies journalières maximales selon la période de retour à Guercif sous l'hypothèse de stationnarité (a), de non stationnarité de la période 1970 – 2010 (b), de non stationnarité à base des médianes (c), de non stationnarité basée sur le 95<sup>ème</sup> percentile des paramètres du modèle ou LR (Lower Risk ) (d) et des niveaux de retour effectifs (e)

## 6 Variabilité thermique du bassin versant de l'Oued Melloulou

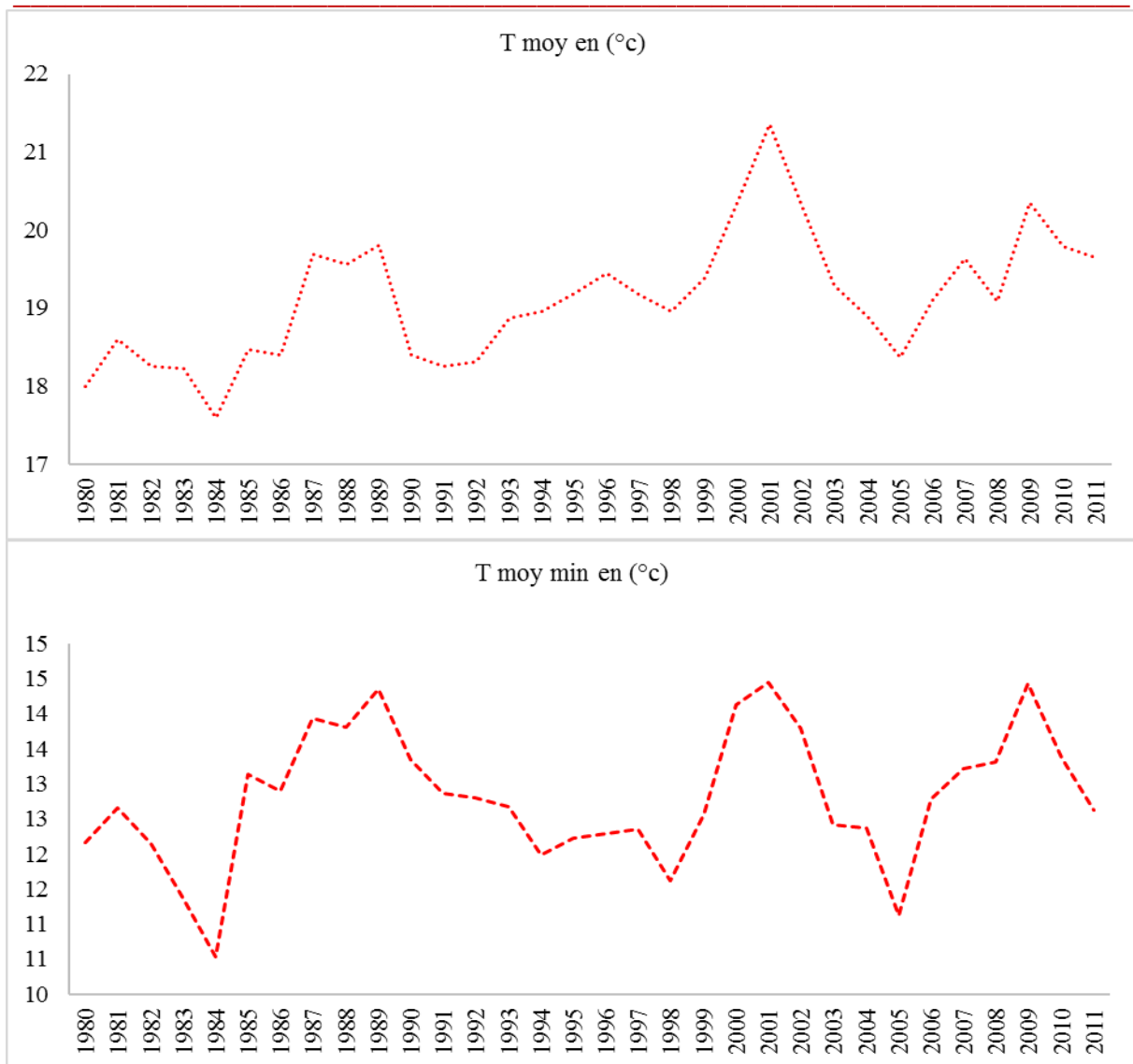
La température est un élément fondamental dans le processus de fonctionnement hydrologique des bassins versants. En effet, la température influence l'écoulement à travers le facteur de l'évapotranspiration qui trace réellement les caractéristiques hydrologiques saisonnières. Pour mettre en lumière la variabilité thermique et le régime des températures au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou, une analyse statistique des données annuelles, saisonnières et mensuelles a été menée sur la période (1980 – 2012). Cette étude est basée sur 3 variables ; la température moyenne maximale ( $T_{\text{moy max}}$ ), la température moyenne minimale ( $T_{\text{moy min}}$ ) et la température moyenne ( $T_{\text{moy}}$ ). Les données disponibles sont celles enregistrées au niveau de la station de Guercif seulement.

### 6.1 Variabilité des températures moyennes annuelles

Au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, la température diminue généralement du nord vers le sud, suivant le profil topographique. Malheureusement, les séries de données des stations de l'amont ne sont pas disponibles, ce qui ne permet pas d'établir une étude approfondie visant l'évaluation de l'influence de ce paramètre climatique sur l'écoulement en amont. Cependant, les données enregistrées à Guercif peuvent nous fournir une vision globale sur la variabilité thermique au niveau du bassin versant (Fig. 51).



**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

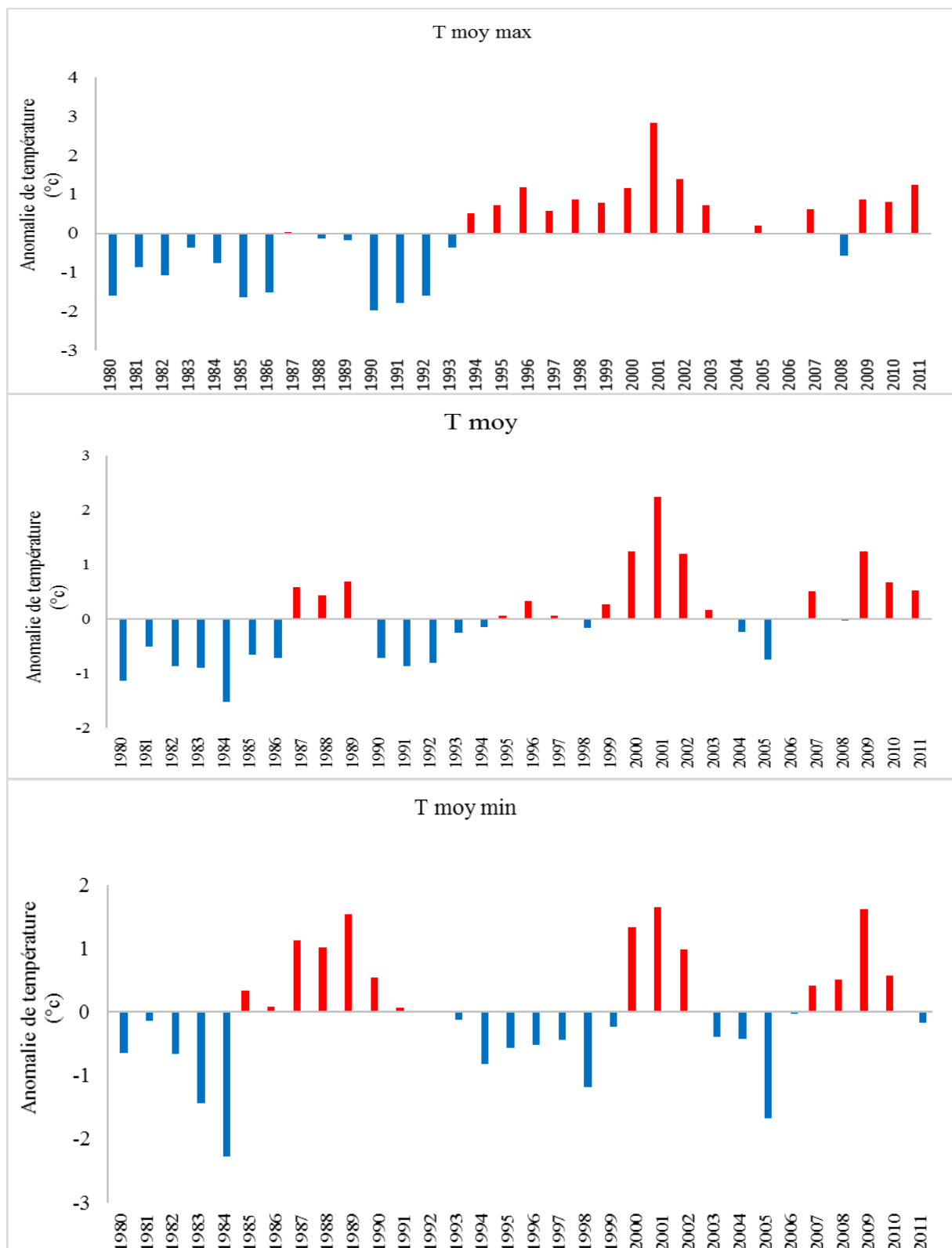


**Figure 51 : Variabilité interannuelle de la température moyenne annuelle maximale, minimale et moyenne (1980/2011) de la station hydrométéorologique de Guercif.**

Les températures moyennes annuelles enregistrées au niveau de la station de Guercif, en aval, se caractérisent par une forte variabilité temporelle d'une année à une autre avec une alternance des petits épisodes chauds et froids. En effet, les figures 52 montrent que :

Au niveau de la série T moy max ; un épisode froid est observé entre 1980 et 1993 et un autre épisode chaud s'étale de 1994 jusqu'à 2010. Alors qu'au niveau de la série des T moy min, nous avons remarqué des épisodes froids de 1980 à 1984, de 1993 à 1999 et de 2003 à 2006. Ces épisodes froids sont séparés par d'autres chauds. Des valeurs élevées ont été observées à partir de 1995, avec un pic de 28.5 °C enregistré en 2001 au niveau de la série des températures moyennes maximales, et 14.5 °C pour la série des températures moyennes

minimales. La température moyenne annuelle calculée pour la même année est de 21.3 °c (Fig 44).



**Figure 52 : Anomalies des températures moyennes annuelles maximales, minimales et moyennes (1980/2011) de la station hydrométéorologique de Guercif.**

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**6.1.1 Étude des tendances thermiques annuelles**

Pour des seuils de confiance de 10, 5 et 1%, le test de tendance de Mann-Kendall a été appliqué sur les séries des données de températures moyennes maximales, températures moyennes minimales et températures moyennes annuelles.

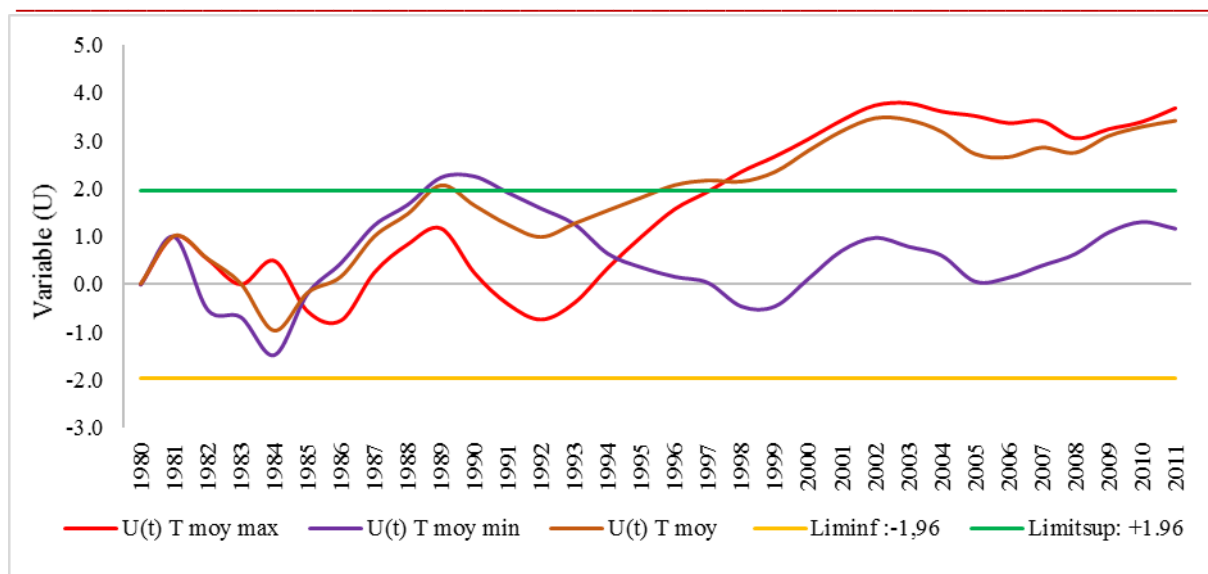
**Tableau 39 : Tendances des températures moyennes annuelles maximales, minimales et moyennes au niveau de la station de Guercif**

	Période	Moyenne	Z de Mann Kendall	Significativité	Pente de Sen
<b>T moy max</b>	1980 - 2011	25.42	3.71	***	0.08
<b>T moy min</b>	1980 - 2011	12.80	1.12		0.02
<b>T moy</b>	1980 - 2011	19.11	3.39	**	0.05

\*\*\* : Seuil de la signification de la tendance à 1 %. \*\* : Seuil de la signification de la tendance à 5 % \* : Seuil de la signification de la tendance à 10 %

Les résultats obtenus affichent une nette tendance à la hausse (Tab 39). Cette tendance est significative au seuil de confiance de 1% ( $\alpha=0.01$ ) pour les données des températures moyennes maximales et de 5% ( $\alpha=0.05$ ) pour les données des températures moyennes. Les valeurs de Z sont de 3.7 et 3.4 respectivement (Tab. 39). Les températures moyennes minimales sont faiblement touchées par cette augmentation, avec une valeur Z = 1.12. La pente de l'augmentation varie de 0.08 °C/an pour les T moy max et de 0.02 °C/an pour les T moy min, selon les résultats estimés par le test de la pente de Sen.

Les tendances linéaires déterminées par le test classique de Mann-Kendall sont confirmées par le test séquentiel de Mann-Kendall. En effet, une tendance à la hausse des températures moyennes maximales et moyennes annuelles est observée depuis 1992. La courbe de tendance U(t) dépasse la limite supérieure du test en 1996. Ce résultat aborde l'augmentation des valeurs des températures moyennes maximales pendant ces dernières années au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou (Fig. 53). Cette tendance thermique influe directement sur le fonctionnement hydrologique à travers l'effet évaporatoire.



**Figure 53 : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux températures moyennes annuelles maximales, minimales et moyennes. (1980, 2011)**

### 6.1.2 Détection des ruptures au sein des séries des températures moyennes annuelles

L'application des tests de détection des ruptures, cités précédemment, est établie sur les données thermométriques disponibles. Les résultats obtenus nous montrent un point de changement de tendance en 1993 au niveau des températures moyennes maximales et des températures moyennes annuelles. Alors que la série des températures moyenne minimales ne présente aucune rupture (Tab. 40).

Ces derniers points de changement ont été également observés dans la présentation graphique du test de Buishand et de Pettitt (Fig. 54). A partir des dates de ruptures, les valeurs moyennes des températures maximales et moyennes ont augmenté. Ces valeurs sont de 24.4 et 18.6 °C respectivement pour la sous-période de 1980 à 1993. Tandis que les moyennes sont de 26.2 et 19.5 °C pour la sous-période de 1993 à 2011 (Fig. 55).

**Tableau 40 : Ruptures détectées au niveau des températures moyennes annuelles max, min et moy au niveau de la station de Guercif**

	Pettitt	Buishand	LEE et Highinian	Hubert
<b>T moy max</b>	1993	1993	1993	1994
<b>T moy</b>	1993	1993	1993	AR
<b>Tmoy min</b>	AR	AR	AR	AR

AR : Absence de rupture

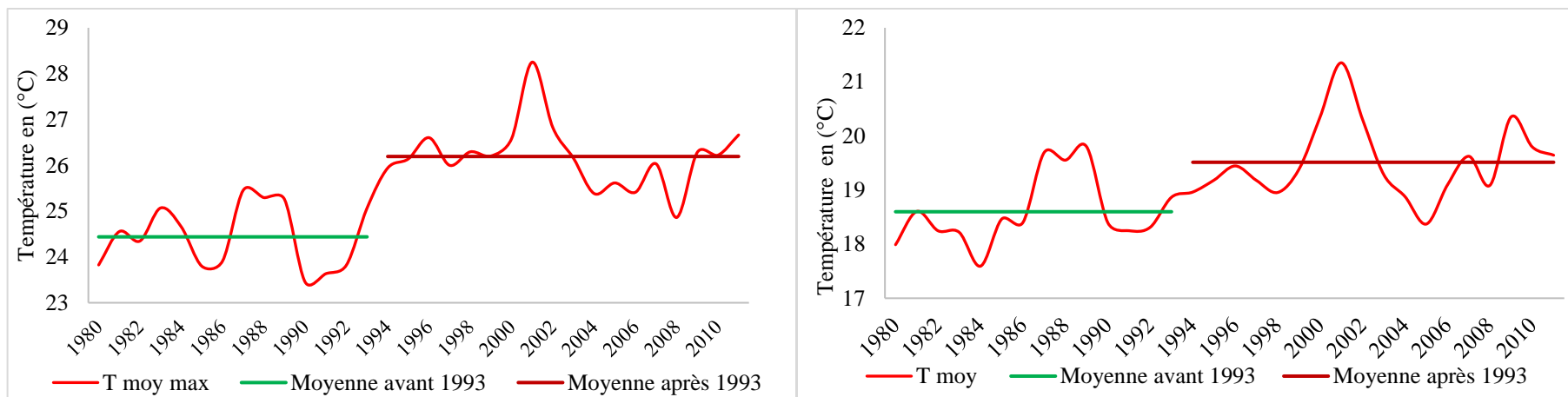


Figure 54 : Moyennes des températures moyennes annuelles maximales et moyennes avant et après les ruptures entre 1980 et 2011

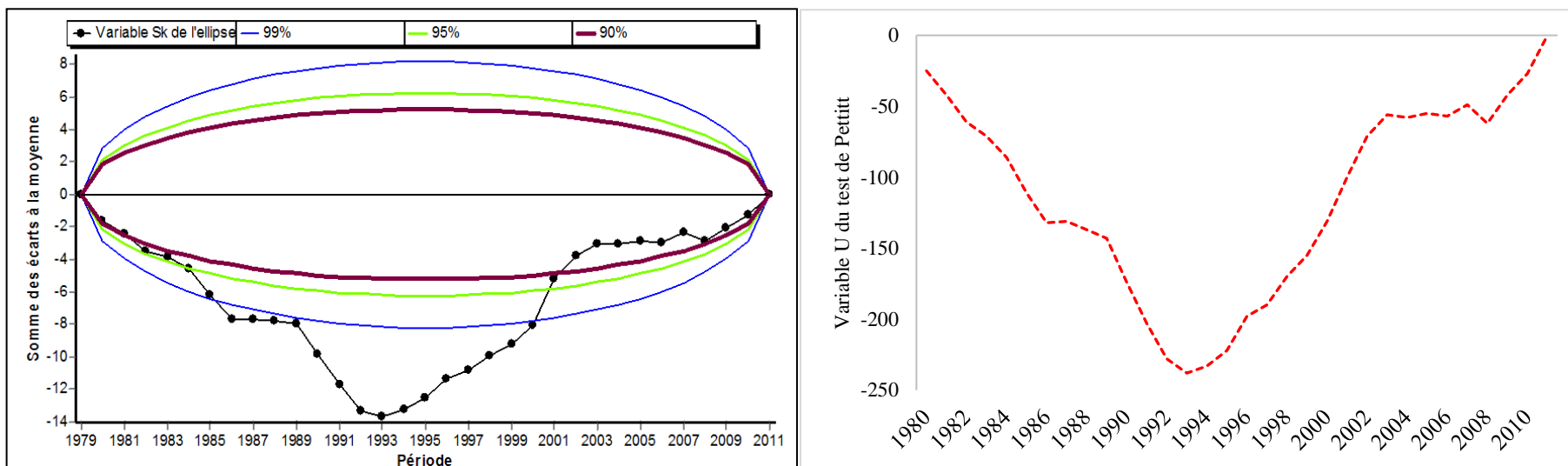


Figure 55 : Présentations graphiques des résultats des tests de Buishand et Pettitt appliqués aux températures moyennes annuelles maximales

## **6.2 Variation des températures moyennes saisonnières**

L'analyse des températures moyennes annuelles n'affiche que la tendance générale de la série sur la période étudiée. Pour prendre une idée assez profonde sur le régime thermique dans une région, il est nécessaire d'analyser les séries des températures moyennes saisonnières et mensuelles.

Les températures moyennes saisonnières les plus élevées sont celles de l'été. Elles oscillent entre 31 et 24.3°C enregistrées en 2000 et 1986 respectivement. Cependant, les valeurs moyennes les plus faibles sont observées en hiver, elles sont de 14.4 et 8.9 °C mesurées en 1996 et 2005. La variabilité de la température moyenne saisonnière est importante d'une année à une autre. La température moyenne maximale la plus haute est celle de l'été de 2003, elle est d'environ 40°C. La valeur moyenne minimale saisonnière la plus faible est de 3.8 °C notée en hiver de 1982 (Fig. 56).

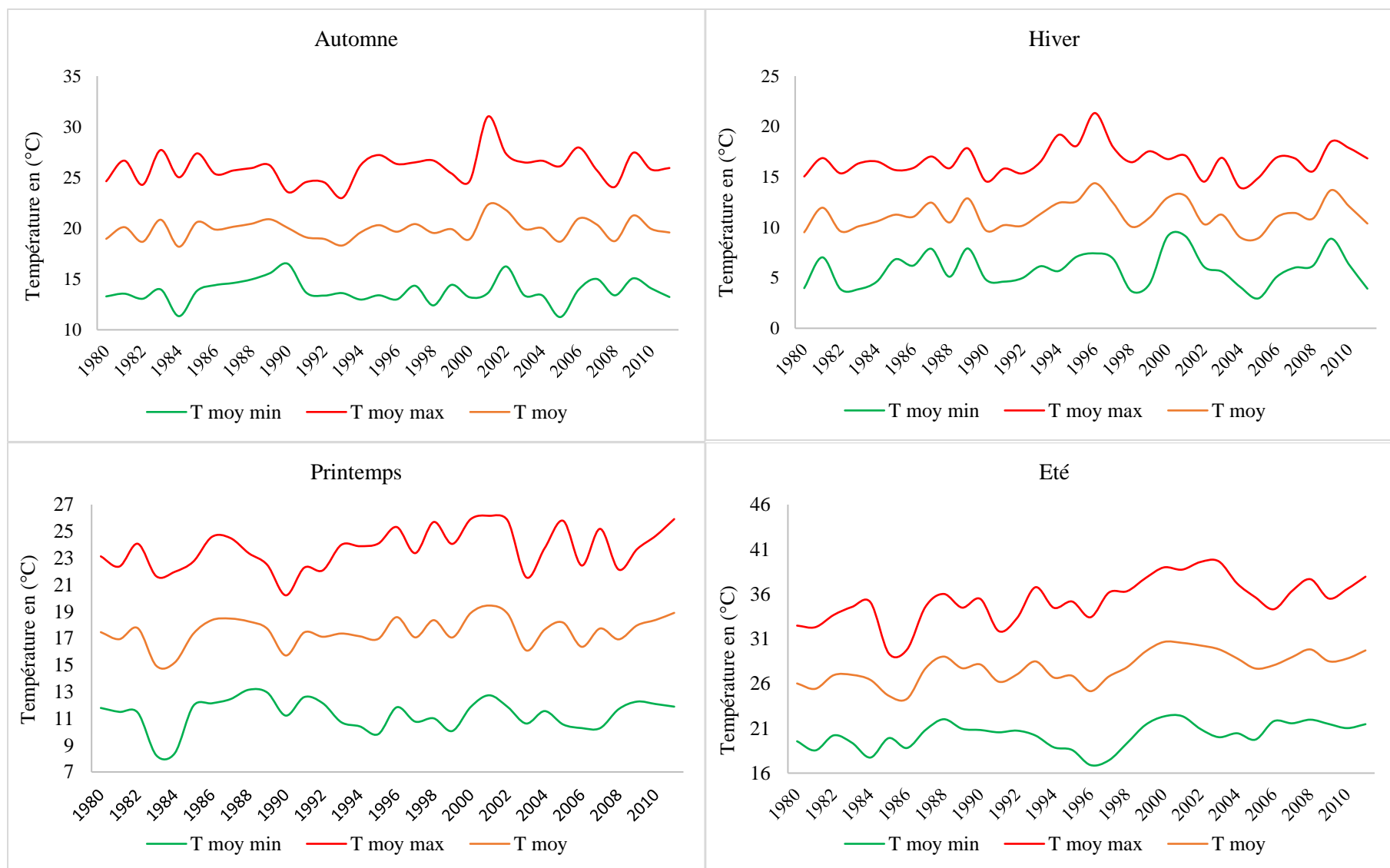


Figure 56 : Variabilité interannuelle des températures moyennes saisonnières, maximales, moyennes et minimales pour les quatre saisons entre 1980 et 2011.

### 6.2.1 Tendances des températures saisonnières

Les résultats issus de l'analyse des tendances thermiques saisonnières moyennant le test de Mann-Kendall montrent une tendance globale vers le réchauffement. On a constaté une nette augmentation des valeurs moyennes des températures. Cette tendance ne semble pas régulière pour toutes les saisons. Les valeurs de Z de Mann-Kendall, appliquées au seuil de significativité de 1, 5 et 10%, sont généralement positives (Tab. 41). La tendance vers la hausse la plus significative est observée en été, ainsi que pour les températures moyennes maximales de la saison printanière. Les résultats de la pente de Sen abordent une augmentation des moyennes saisonnières des températures en été pour atteindre 0.18 °C /an pour les T moy max et 0.12 °C /an pour les T moy. Un faible haussement des températures moyennes minimales a été également constaté.

**Tableau 41 : Différentes tendances remarquées dans les séries des températures moyennes saisonnières**

		Période	Moyenne	Z de Mann Kendall	Pente de Sen
Automne	<i>T moy</i>	1980 - 2011	19.9	0.54	0.014
	<i>T moy max</i>	1980 - 2011	26	1.22	0.034
	<i>T moy min</i>	1980 - 2011	13.8	0.15	0.002
Hiver	<i>T moy</i>	1980 - 2011	11.2	1.05	0.031
	<i>T moy max</i>	1980 - 2011	16.6	1.09	0.031
	<i>T moy min</i>	1980 - 2011	5.8	0.52	0.02
Printemps	<i>T moy</i>	1980 - 2011	17.5	1.44	0.031
	<i>T moy max</i>	1980 - 2011	23.7	<b>2.25</b>	0.08
	<i>T moy min</i>	1980 - 2011	11.3	-0.19	-0.005
Eté	<i>T moy</i>	1980 - 2011	27.8	<b>3.62</b>	0.12
	<i>T moy max</i>	1980 - 2011	35.5	<b>3.94</b>	0.17
	<i>T moy min</i>	1980 - 2011	20.25	<b>2.48</b>	0.063

Pour les séries des 4 saisons, les courbes de la variable U(t) relatives aux séries des températures présentent une stabilité de 1980 à 1993. Après, les tracées des températures moyenne maximale du printemps et des trois tracées d'été montrent une tendance vers l'augmentation. Ces tendances sont devenues significatives, généralement, depuis 1996 (Fig. 57). Cette augmentation significative a touché également la température de l'hiver entre 1995 et 2002. Les autres séries présentent une variabilité moins importante entre les deux bornes du test (Fig. 57).

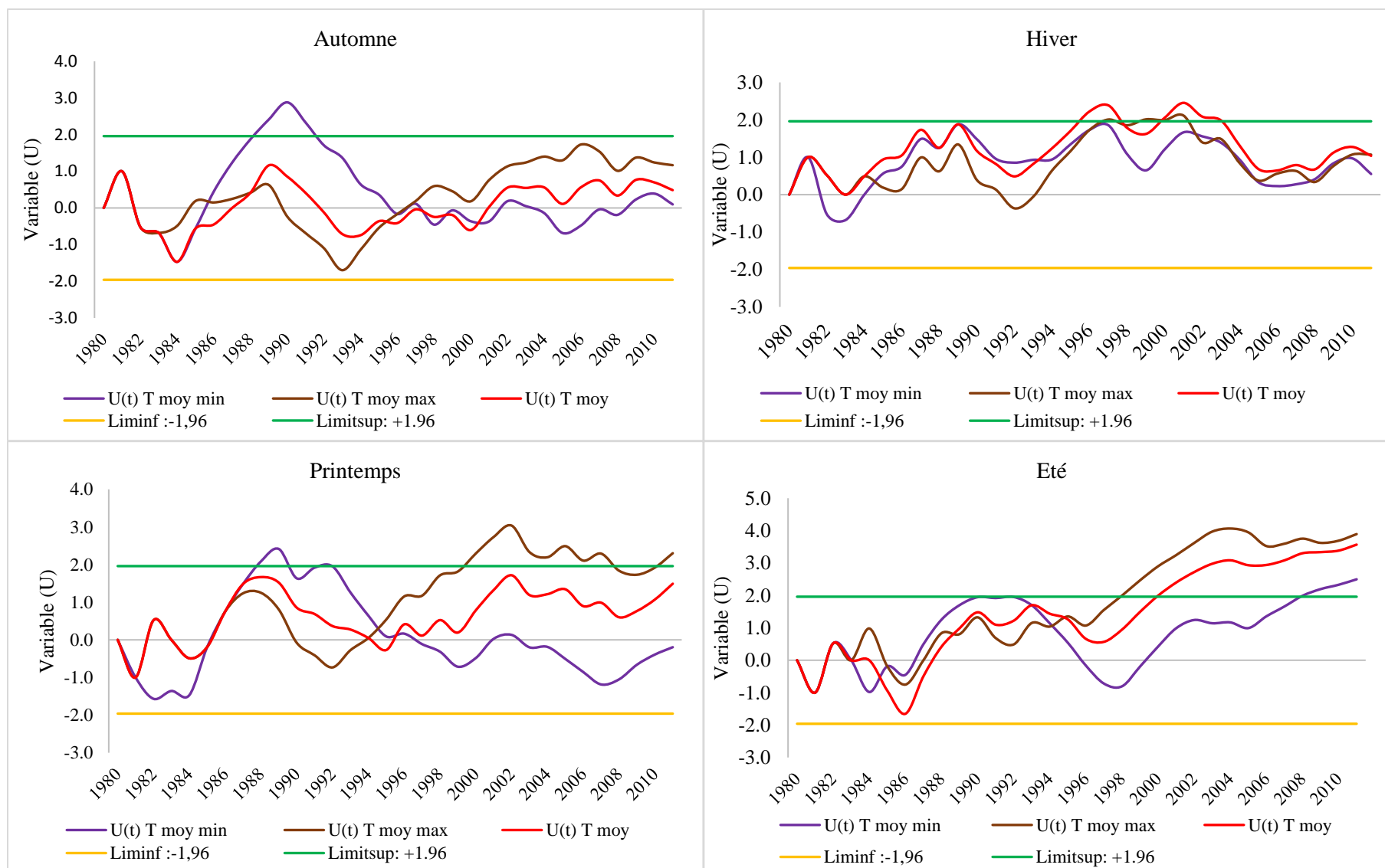


Figure 57 : Évolution des courbes  $U(t)$  du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux températures moyennes saisonnières max, moy et min. (1980, 2011).

### 6.2.2 Détection des ruptures dans les séries saisonnières

Les tests de tendances précédents nous fournissent idée claire sur l'orientation tendance globale des températures. Cependant, les tests de détection de ruptures appliqués sur les températures moyennes saisonnières affichent quelques points de changement de tendance à des dates différentes. Les résultats montrent que les principales ruptures sont observées notamment au niveau des séries des températures moyennes maximales, en 1993 pour les  $T_{\text{moy max}}$  de l'hiver et d'automne et en 1992 pour celles du printemps. Alors que pour les températures, la rupture a été détectées en 1997 pour les  $T_{\text{moy min}}$ , en 1996 pour les  $T_{\text{moy max}}$  et 1998 pour les  $T_{\text{moy}}$  (Tab. 42).

**Tableau 42 : Différentes ruptures détectées au niveau des températures moyennes saisonnières maximales, moyennes et minimales (1980 - 2011)**

		Buishand	Pettitt	Hubert	Lee et Heghinian
Automne	$T_{\text{moy}}$				
	$T_{\text{moy max}}$				1993
	$T_{\text{moy min}}$				
Hiver	$T_{\text{moy}}$				
	$T_{\text{moy max}}$				1993
	$T_{\text{moy min}}$				
Printemps	$T_{\text{moy}}$				
	$T_{\text{moy max}}$	1992	1992	1992	1992
	$T_{\text{moy min}}$				
Été	$T_{\text{moy}}$	1997	1997	1998	1998
	$T_{\text{moy max}}$	1996	1996	1996	1996
	$T_{\text{moy min}}$	1998	1998	1998	1998

Les ruptures les plus significatives sont celles signalées en été. La présentation graphique du test de Buishand et de Pettitt affiche que l'hypothèse nulle "absence de rupture" est rejeté au seuil de 90, 95 et 99% pour les températures moyennes maximales et températures moyennes (Fig. 58). Après ces ruptures, une tendance à la hausse des  $T_{\text{moy max}}$  a commencée. Cette augmentation des températures est fortement significative en été. Le rapport entre la moyenne d'avant la rupture et celle d'après est de 3.46°C pour la température moyenne maximale, 2.4 °C pour  $T_{\text{moy}}$  et 1.8 °C pour  $T_{\text{moy min}}$ . L'augmentation la plus faible de la température moyenne maximale saisonnière est celle de l'hiver avec une valeur de 1.02 °C (Tab. 43).

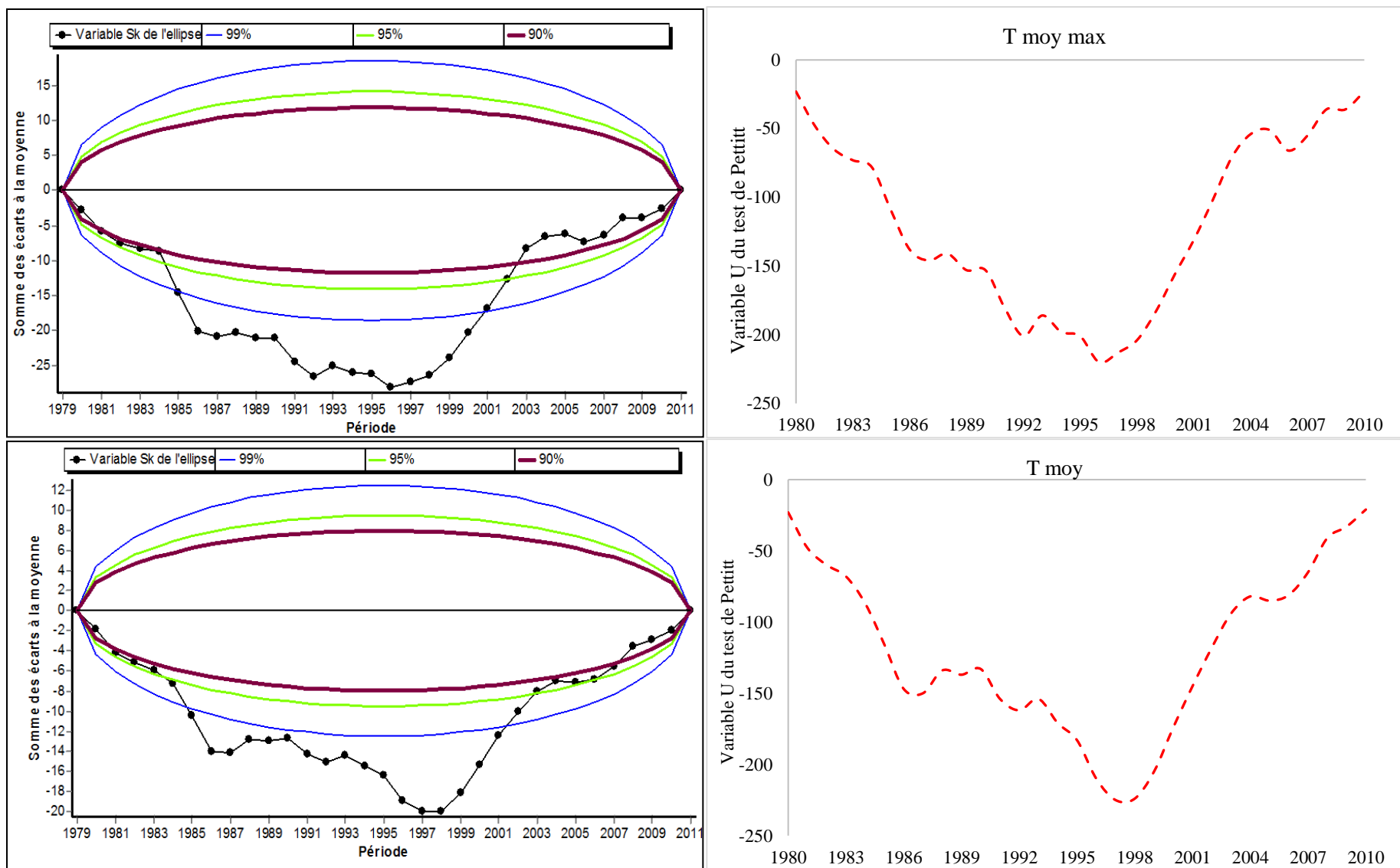


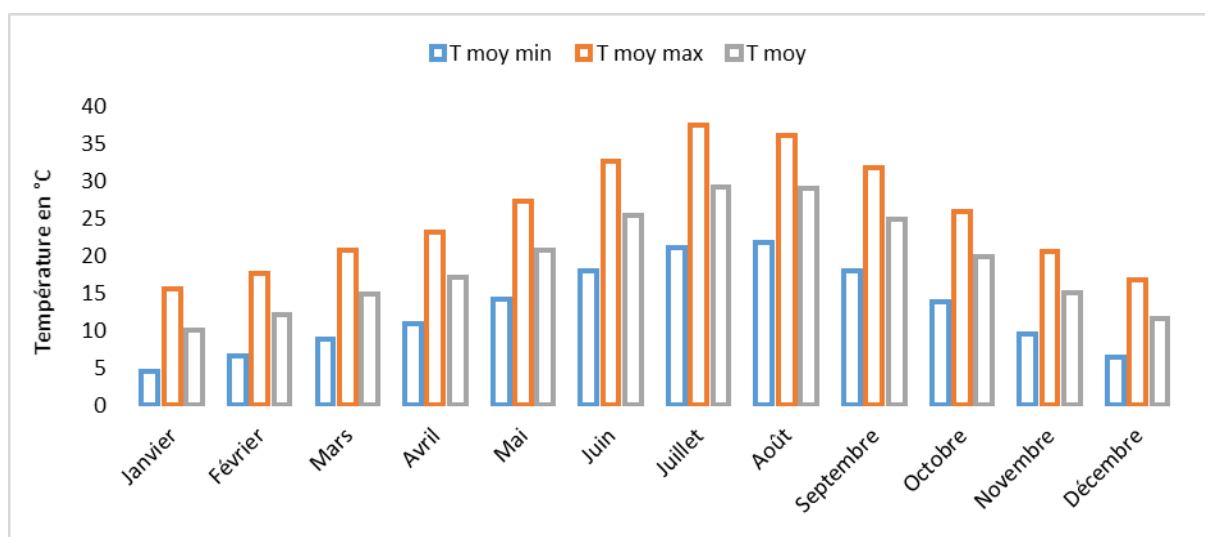
Figure 58 : Présentation graphique des résultats des tests de Buishand et de Pettitt appliqués aux températures moyennes maximales et moyennes de la saison estivale (1980 - 2011)

**Tableau 43 : Moyennes des températures avant et après les ruptures**

		Date de rupture	Moyenne avant la rupture °C	Moyenne après la rupture °C	Ecart de température
<b>Automne</b>	T moy max	1993	24.33	25.53	1.20
<b>Hiver</b>	T moy max	1993	16.05	17.07	1.02
<b>Printemps</b>	T moy max	1992	22.73	24.39	1.66
<b>Eté</b>	T moy max	1997	33.84	37.30	3.46
	T moy	1996	26.70	29.10	2.40
	T moy min	1998	19.55	21.35	1.80

### 6.3 Analyse des températures moyennes mensuelles

Concernant la variation mensuelle des températures, janvier présente le mois le plus froid de l'année, avec une moyenne mensuelle de 10°C, tandis que le mois le plus chaud est celui de juillet, avec une moyenne mensuelle de 29.17°C (Fig. 59).



**Figure 59 : Variabilité des températures moyennes mensuelles au niveau de la station de Guercif**

#### 6.3.1 Régime thermique probable

Sauf la courbe du régime des T moy max à une fréquence de 10% (D1) qui présente un régime bimodal avec deux maximums en juillet et en septembre. L'analyse fréquentielle des températures moyennes mensuelles, minimales et maximales, montre un régime unimodal, avec une seule valeur maximale :

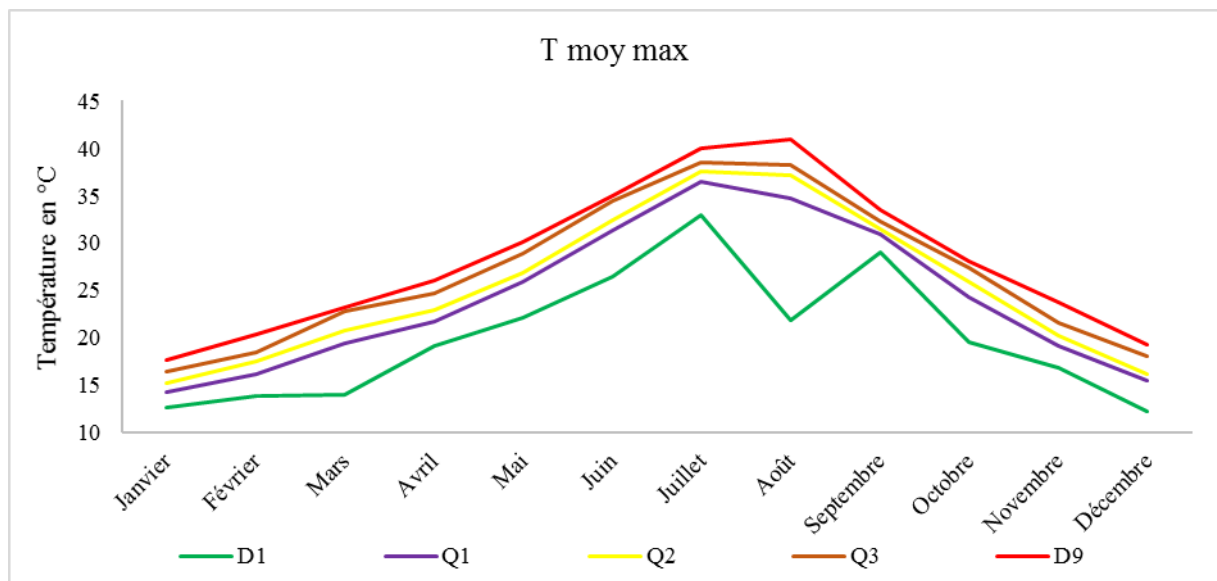
- **Le régime probable des T moy min** : A l'exception de la courbe de la fréquence (D1) qui affiche un pic en juillet, les tracées des autres fréquences montrent des valeurs maximales en août. En effet, pour une fréquence D9, considérée comme une année extrêmement chaude, la température moyenne minimale probable ne dépasse pas 24 °C.

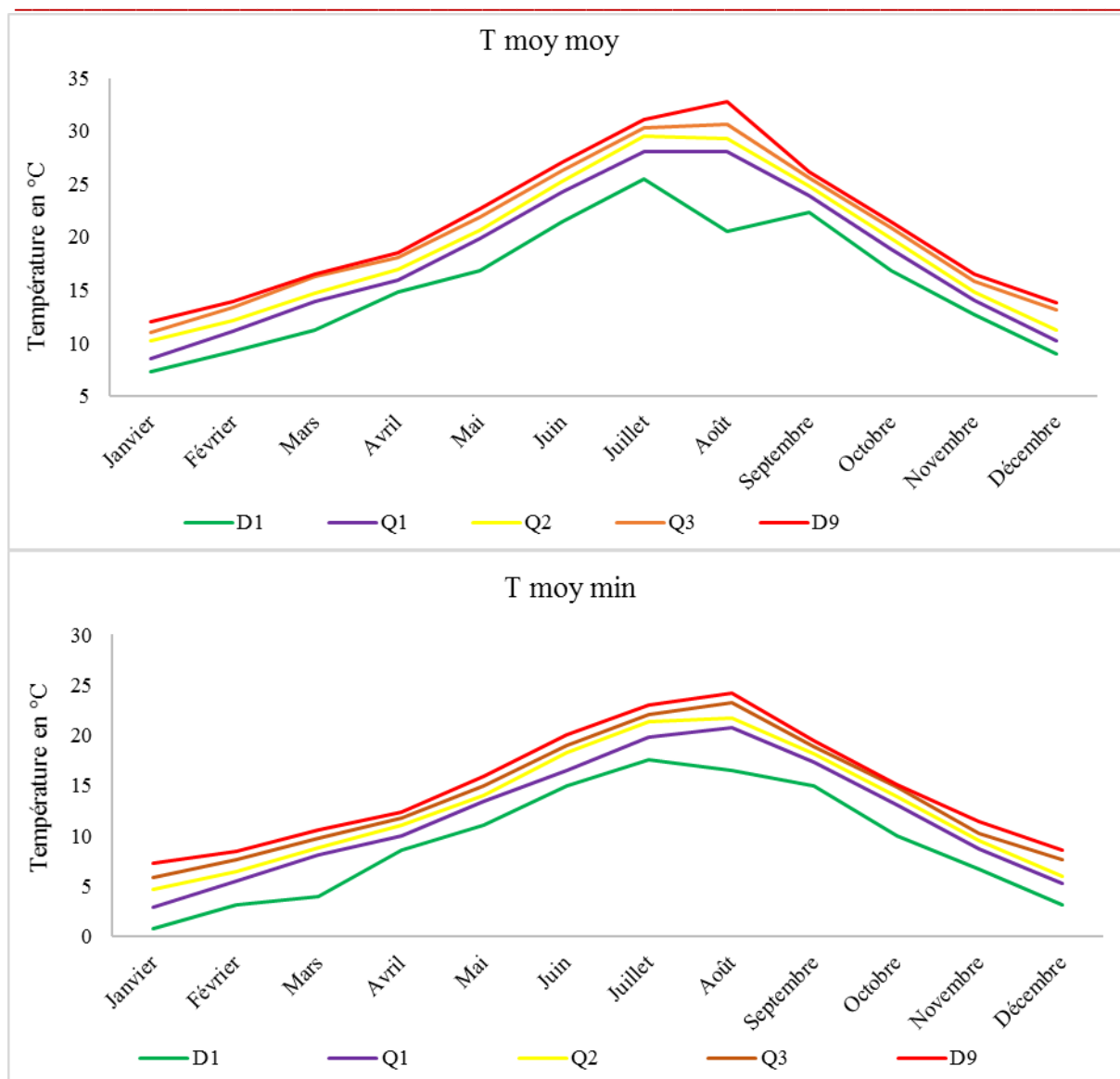
**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

En même temps, la valeur de non dépassement probable pour la fréquence médiane Q2 est de 22°C. Les écarts les plus remarquables sont ceux entre les valeurs probables d'une année extrêmement froide, (D1), et les valeurs probables d'une année froide (Q1). Les faibles écarts observés entre les courbes montrent une variabilité temporelle assez faible des températures moyennes minimales (Fig. 60).

• **Le régime probable des T moy max** : Pour la fréquence D1, les températures moyennes maximales présentent un régime bimodal avec deux maximums, le premier est en juillet et le second est en septembre. Alors que, les régimes probables pour les autres fréquences sont unimodaux avec un seul pic en juillet pour Q1, Q2 et Q3 et en août Pour Q9. La température moyenne maximale peut atteindre 41°C en août d'une année extrêmement chaude. Cette valeur semblable avec la valeur maximale des T moy max enregistrées en août (Fig. 60).

• **Le régime probable des T moy moy** : l'influence des températures moyennes maximales sur les moyennes mensuelles est remarquable. En effet, il ressort que les régimes probables des T moy mensuelles estimés ont plus ou moins la même allure de ceux des T moy max (Fig. 60).

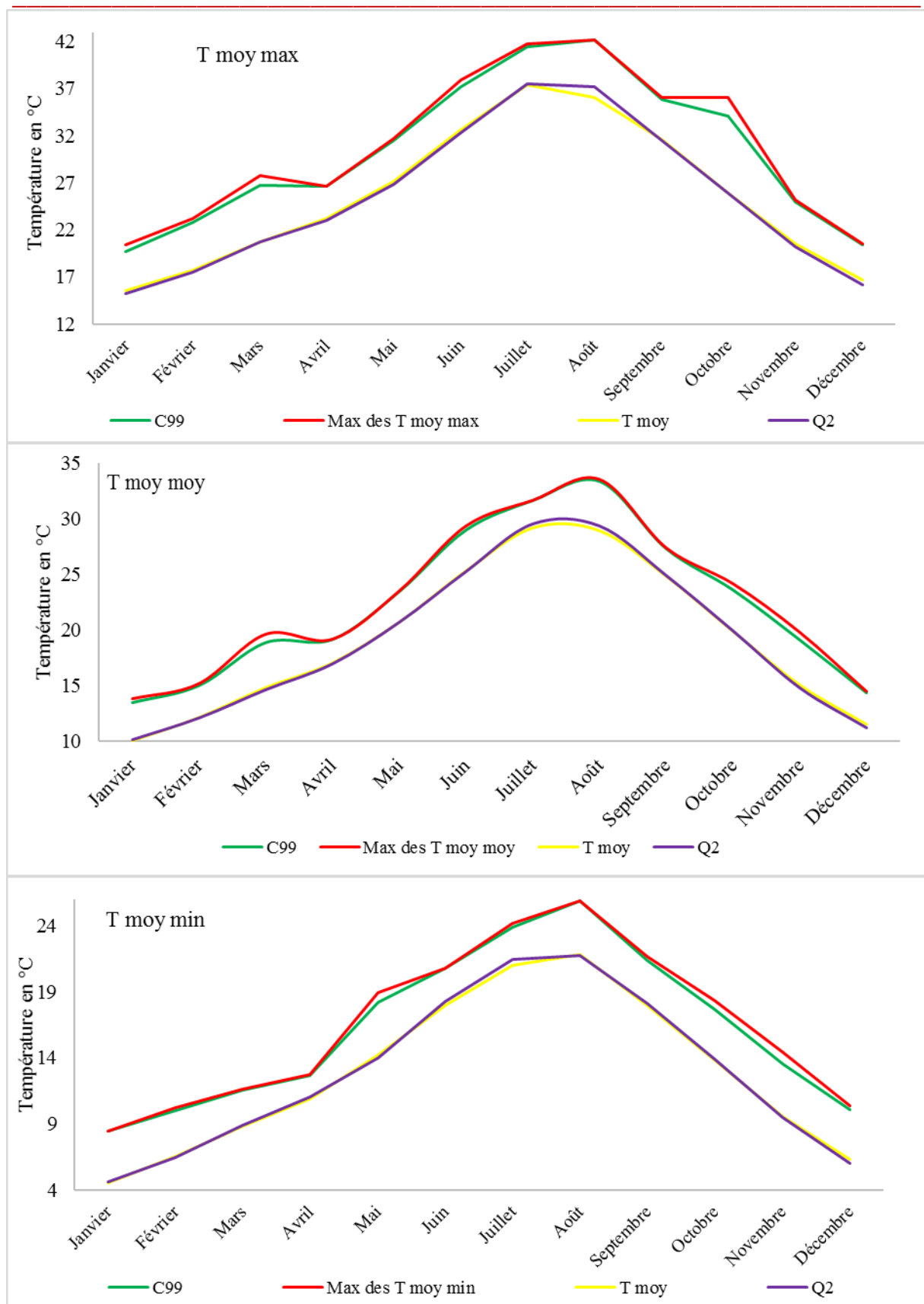




**Figure 60 : Résultats de l'analyse fréquentielle des températures moyennes mensuelles (1980-2011)**

Nous avons également estimé les températures probables pour les années exceptionnellement sèches au seuil de 99<sup>ème</sup> percentile (C99). Il semble que ces valeurs coïncident avec les températures maximales mesurées. Il convient également de noter que les courbes des températures moyennes maximales et minimales concordent avec celles médianes, estimées en fréquence d'une année sur deux (Q2) (Fig. 61).

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**



**Figure 61 : Courbes des températures moyennes mensuelles, de Q2, des max des Tmoy moy et de C99.**

### 6.3.2 Tendances des températures mensuelles

Les résultats obtenus de l'identification des tendances générales des températures mensuelles abordent que :

- **Au niveau des séries des T moy max** : sauf pour le mois de septembre qui présente une diminution, les tendances thermiques sont vers l'augmentation. Le degré de significativité de ces dernières varie d'un mois à un autre. En effet, les trois mois de l'été plus avril et mai présentent les tendances les plus significatives, avec une valeur de Z arrive à 3.45 pour la série de T moy max du mois d'août (Tab. 44).

- **Au niveau des séries des T moy**: Elles présentent le même allure des T moy max, avec une significativité aussi importante.

- **Au niveau des séries des T moy min** : la tendance est vers la diminution des valeurs des températures des mois de novembre, février, mars et avril, cette tendance est non significative. Tandis que les autres affichent un haussement. La tendance significative est observée seulement en juillet. Ce dernier paramètre présente la température enregistrée pendant la nuit. Les tendances vers la diminution des températures montrent une faible nébulosité du ciel engendrant une perte rapide de l'énergie thermique de surface et par conséquent moins de précipitations surtout pendant la saison printanière (Tab. 44).

**Tableau 44 : Tendances des températures moyennes mensuelles selon le test classique de Mann-Kendall.**

	<i>T moy max</i>	<i>Significativité</i>	<i>Tmoy</i>	<i>Significativité</i>	<i>T moy min</i>	<i>Significativité</i>
<b>Septembre</b>	-0.44		0.41		0.96	
<b>Octobre</b>	1.31		0.99		0.26	
<b>Novembre</b>	0.63		0.16		-0.58	
<b>Décembre</b>	0.83		0.79		0.41	
<b>Janvier</b>	0.99		1.65		1.25	
<b>Février</b>	1.12		0.41		-0.57	
<b>Mars</b>	0.18		-0.41		-0.62	
<b>Avril</b>	2.48	*	2.06	*	-0.15	
<b>Mai</b>	2.77	**	1.85		0.41	
<b>Juin</b>	3.24	**	3.00	**	1.49	
<b>Juillet</b>	2.61	**	2.97	**	2.29	*
<b>Août</b>	3.45	***	2.81	**	1.49	

\*\*\* : Seuil de la signification de la tendance à 1 %. \*\* : Seuil de la signification de la tendance à 5 % \* : Seuil de la signification de la tendance à 10 %

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**6.4 Tendances des indices issus des températures moyennes journalières**

Les tendances des indices relatifs à la température, évaluées au même seuil de significativité que celui des précipitations, sont présentées dans le Tableau 45. Les indices qui présentent une tendance vers l'augmentation sont : *TXn*, *TNn*, *DTR*, *TX90p*, *TXge30*, *TXge35*, *TXgt50p*, *TXm*, *TMm*, *TMge10*, *SU* et *hwf\_TX90*. Alors que ceux qui présentent une tendance négative sont : *TNx*, *TN10p*, *TX10p*, *CSDI*, *TMI10* et *CSdi2*.

L'ensemble des indices, calculés à l'échelle annuelle, indiquent une augmentation des températures maximales et moyennes journalières. Ainsi, la diminution de la fréquence des nuits chaudes, montre une absence des nuages, c'est l'un des indicateurs de la sécheresse.

L'augmentation des valeurs des températures maximales et la fréquence des vagues de chaleur est probablement le facteur qui explique le caractère orageux des précipitations que reçoit le bassin versant de l'Oued Melloulou.

**Tableau 45 : Indices liés aux températures calculés par le logiciel RCLimindex qui présentent une tendance significative**

Indice	P-value	Tendance	Degré de significativité
Nuits les plus chaudes (TNx)	0.068	<i>Négative</i>	Significative
Jours les plus froids (TXn)	0	<i>Positive</i>	Très forte significativité
Nuits les plus froides (TNn)	0.067	<i>Positive</i>	Significative
Amplitude diurne (DTR)	0.044	<i>Positive</i>	Forte significativité
Fréquence des nuits froides (TN10p)	0.038	<i>Négative</i>	Significative
Fréquence des jours froids (TX10p)	0.001	<i>Négative</i>	Très forte significativité
Fréquence des jours chauds (TX90p)	0.095	<i>Positive</i>	Significative
Séquences froides (CSDI)	0.062	<i>Négative</i>	Significative
Le nombre de jours de l'année, dont la température maximale $\geq 30^{\circ}\text{C}$ (TXge30_ANN)	0	<i>Positive</i>	Très forte significativité
Le nombre de jours de l'année, dont la température maximale $\geq 35^{\circ}\text{C}$ (TXge35_ANN)	0.001	<i>Positive</i>	Très forte significativité
Le pourcentage des jours de l'année, dont la température maximale $\geq 50^{\text{ème}}$ percentile (TXgt50p_ANN)	0	<i>Positive</i>	Très forte significativité
La moyenne annuelle journalière maximum de température (TXm_ANN)	0.004	<i>Positive</i>	Très forte significativité
La moyenne annuelle journalière des températures moyenne (TMm_ANN)	0.001	<i>Positive</i>	Très forte significativité
Le nombre des jours, dont la température moyenne $\leq 10^{\circ}\text{C}$ (TMI10_ANN)	0.054	<i>Négative</i>	Significative
Le nombre des jours, dont la température moyenne $\geq 10^{\circ}\text{C}$ (TMge10_ANN)	0.077	<i>Positive</i>	Significative
Le nombre des jours, dont la température maximale $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (SU-ANN)	0.064	<i>Positive</i>	Significative
Fréquence des vagues de chaleur (nombre de jours contribuant aux événements de canicule) (hwf_TX90_ANN)	0.004	<i>Positive</i>	Très forte significativité
Nombre de vagues de chaleur (nombre d'événements discrets de vagues de chaleur) (CSdi2_ANN)	0.062	<i>Négative</i>	Significative

A l'échelle mensuelle, les indices calculées à partir des données journalières des températures montrent une tendance vers l'augmentation des amplitudes diurnes (dtr) des

températures pour tous les mois. Cette tendance est statistiquement significative au seuil de  $\alpha = 0.05$ , en avril, mai et août. Les températures moyennes maximales ont également augmenté surtout pour celles de l'été (une augmentation significative en juillet). L'indice d'occurrence des nuits froides (tn10p) présente une tendance vers la diminution presque généralisée (une diminution significative en janvier). Une augmentation significative a été observée au niveau des séries des 5 mois de l'année, d'avril à août, pour l'indice de txgt50p qui présente les pourcentages des jours dont la température moyenne maximale dépasse la valeur du 50<sup>ème</sup> percentile.

**Tableau 46 : Tendence des Indices liés aux températures moyenne journalière calculées à l'échelle mensuelle**

	dtr	tn10p	tnn	tnx	tx10p	tx90p	txgt50p	txm	txn
Janvier	0.00	-2.34	1.50	0.31	0.13	0.66	0.23	0.59	0.11
Février	1.12	-0.38	0.00	-1.67	-2.33	-0.07	1.71	1.62	1.81
Mars	0.20	-1.47	-0.22	-1.84	-1.79	-0.88	0.39	0.45	3.77
Avril	2.31	0.55	-0.53	-1.48	-1.60	1.81	2.09	2.18	2.14
Mai	2.18	-0.56	0.10	-0.48	-2.43	1.10	1.99	2.48	1.81
Juin	1.65	-1.21	1.48	-0.02	-1.86	2.52	2.69	3.03	1.55
Juillet	0.80	-1.63	2.31	1.17	-3.18	0.81	2.87	2.99	2.97
Août	2.89	-1.34	1.21	-1.89	-2.81	1.35	2.68	3.12	2.87
Septembre	-0.77	-1.93	1.05	-0.49	0.36	-0.05	-0.54	-0.54	1.13
Octobre	0.71	-0.87	0.07	-0.51	-0.16	0.49	0.95	0.95	0.13
Novembre	1.21	0.27	-0.93	-1.53	-0.49	1.21	0.00	0.41	1.23
Décembre	0.36	-1.80	0.00	-1.89	-0.45	0.09	0.55	0.61	0.55

## 7 Estimation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration (ET) est un terme global qui regroupe tous les processus qui transforment l'eau liquide ou solide, à la surface du sol ou à proximité, en vapeur d'eau. Elle est la combinaison de deux processus : l'évaporation physique et la transpiration des végétaux.

L'évapotranspiration (ET) est dépendante de l'énergie solaire et de l'état de la surface terrestre. Elle constitue une composante importante du cycle de l'eau et l'un des principaux flux du bilan hydrique. Elle représente généralement entre 60 à 80 % du retour vers l'atmosphère des précipitations dans les régions arides et semi-arides (Hamimed et Rabha, 2008). Les mesures de ET fait à travers deux paramètres : L'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle ETR. Le premier désigne la quantité d'eau

potentiellement évaporée si le sol est saturé en eau, alors que le deuxième est la quantité réellement évaporée.

Dans un milieu aride couvert par des terres agricoles irriguées, comme le nôtre, l'estimation et l'analyse de la variabilité de l'évapotranspiration est une étape primordiale.

### 7.1 Estimation de l'ETP mensuelle

De nombreuses méthodes d'estimation de l'ETP ont été utilisées dans la littérature hydrologique. Il est très difficile d'avantager l'une de ces formules au détriment de l'autre; chacune a ses avantages et ses limites d'application en fonction des caractéristiques climatiques de chaque région (Mouhdi, 1993). La plus couramment utilisée est la méthode de Penman (1948), mais elle nécessite des données dont nous ne disposons pas. Pour cela, nous avons utilisé la formule de Thornthwaite (1948). Elle a cependant le mérite d'être simple et n'exige que la connaissance de la température moyenne mensuelle. La formule s'écrit comme suit :

$$ETP = 16 \times \left( \frac{10 \times T_k}{I} \right)^\alpha \times K$$

**Avec :** *ETP* : évaporation mensuelle en mm ; *t* : températures moyennes mensuelles ; *I* : indice thermique annuel qui est la somme des douze valeurs mensuelles de  $i = (0.2 \cdot t)^{1.514}$   $I = \sum_{i=1}^{12} i$   
*K* : est le coefficient de correction lié à la latitude de la station et du mois considéré (Tab...).

Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
1.03	0.97	0.87	0.86	0.88	1.85	1.03	1.09	1.2	1.2	1.22	1.16

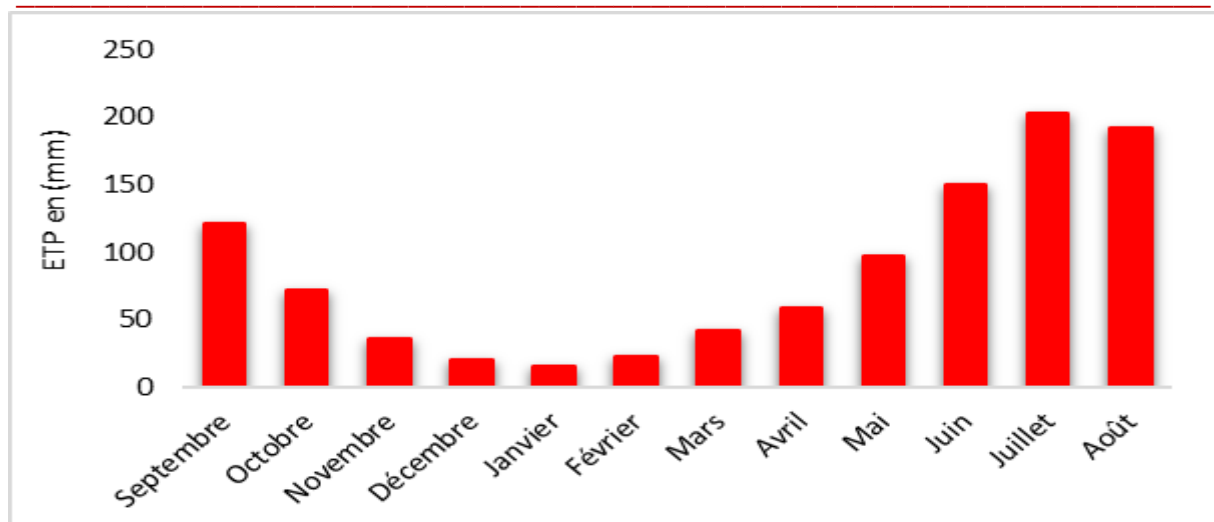
$$\alpha = 6.75 \cdot 10^{-7 \cdot I^3} - 7.71 \cdot 10^{-5 \cdot I^2} + 1.79 \cdot 10^{-2 \cdot I} + 0.49239$$

L'estimation de l'évapotranspiration mensuelle par la formule de Thornthwaite a été établie uniquement pour la station de Guercif, là où on dispose des données de la température.

Les valeurs moyennes mensuelles d'ETP calculées au niveau de la station de Guercif affichent une forte variabilité au cours de l'année (Fig. 62). Ces valeurs varient en fonction de la température moyenne mesurée pour chaque mois. En effet, la valeur moyenne mensuelle la plus élevée d'ETP et de 202 mm estimée en Juillet. Alors que, pour le mois de janvier qui est le plus froid, la valeur moyenne d'ETP ne dépasse pas 20 mm.

Toutes les valeurs moyennes mensuelles d'ETP calculées sont supérieures à celles des précipitations mensuelles, ce qui présente un déficit hydrique théorique pour tous les mois de l'année. Ce déficit est très significatif pendant les mois de l'été (Tab.47).

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

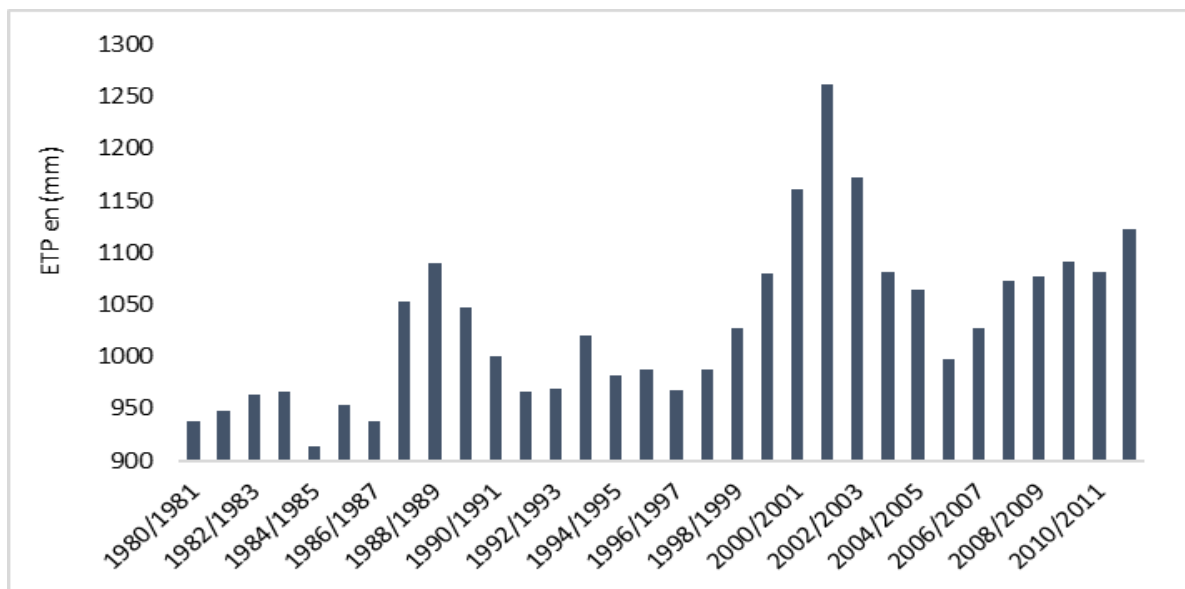


**Figure 62 : Evapotranspiration moyenne mensuelle estimée au niveau de la station de Guercif.**

**Tableau 47 : Bilans hydriques mensuels P-ETP**

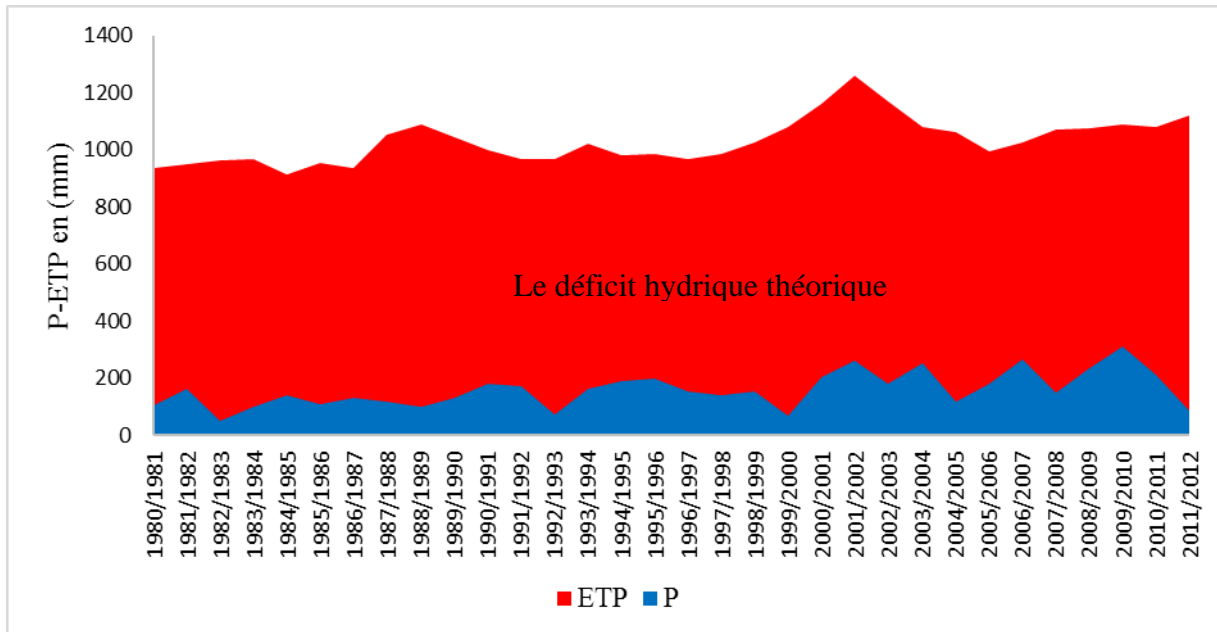
	S	O	N	D	Ja	F	Ma	Av	M	Ju	Jt	A
<b>P moy</b>	12	18	21	14	16	13	18	22	15	7	1	4
<b>ETP moy</b>	121	72	36	21	16	23	42	59	97	151	203	192
<b>P-ETP</b>	-110	-54	-15	-6	0	-9	-23	-36	-82	-144	-201	-188

La somme des valeurs d'ETP calculées à l'échelle mensuelle nous permet d'extraire l'évapotranspiration potentielle annuelle. Les résultats obtenus (Fig. 63) montrent une irrégularité interannuelle assez importante entre 1980 et 2012. Les valeurs cumulées de l'ETP comprises entre 913 mm en 1984/1985 et 1261 en 2001/2002.



**Figures 63 : Variabilité interannuelle de l'évapotranspiration entre 1980/1981 et 2011/2012 selon la méthode de Thornthwaite.**

Ces valeurs sont largement supérieures aux cumuls annuels des précipitations enregistrées. Ce qui provoque un bilan hydrique extrêmement déficitaire. En effet, le grand déficit enregistré est celui de 2011/2012 avec une valeur de -1032 mm alors que le plus faible et celui de 2006/2007 avec une valeur de -760 mm (Fig. 64).



**Figure 64 : Déficit hydrique théorique interannuelle P-ETP**

Les résultats issus des tests de tendances appliqués sur les données d'ETP annuelle, saisonnière et mensuelle montrent la même allure de la température moyenne (Annexes. 5, 8 et 12).

## 7.2 Estimation de l'évapotranspiration réelle théorique ETR

Selon les résultats obtenus de l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, on a constaté que pour toutes les années, ETP est supérieur à P. Cela signifie que la demande climatique en vapeur d'eau est toujours forte que l'offre en eau par les apports pluviométriques. On peut conclure que  $ETR$  (théorique) = P. Pour confirmer cette conclusion, l'estimation de l'ETR est primordiale. Pour cet objectif, plusieurs méthodes empiriques ont été utilisées. Parmi ces formules, on peut citer le bilan de Thornthwaite (1955), Coutagne (1954) et la méthode de Turc (1961).

### 7.2.1 Méthode de Coutagne (1954).

La détermination de l'ETR à partir de la méthode de Coutagne fournit des bons résultats sur l'étude du bilan hydrologique (Kouassi et al., 2012b). La formule mathématique utilisée est la suivante :

$$ETR = P - YP^2$$

Avec :  $Y = 1 / (0,8 + 0,145t)$   $t$  : température moyenne annuelle en °C ;  $P$  : précipitation moyenne annuelle en m.

Cette méthode n'est applicable que si  $1/8 Y < P < 1/2Y$  avec  $P$  en m (N'Guessan et al., 2014).

Puisque  $P$  est supérieur à  $1/2Y$ , l'application de cette méthode est n'est pas possible dans notre cas.

### 7.2.2 Méthode de Turc

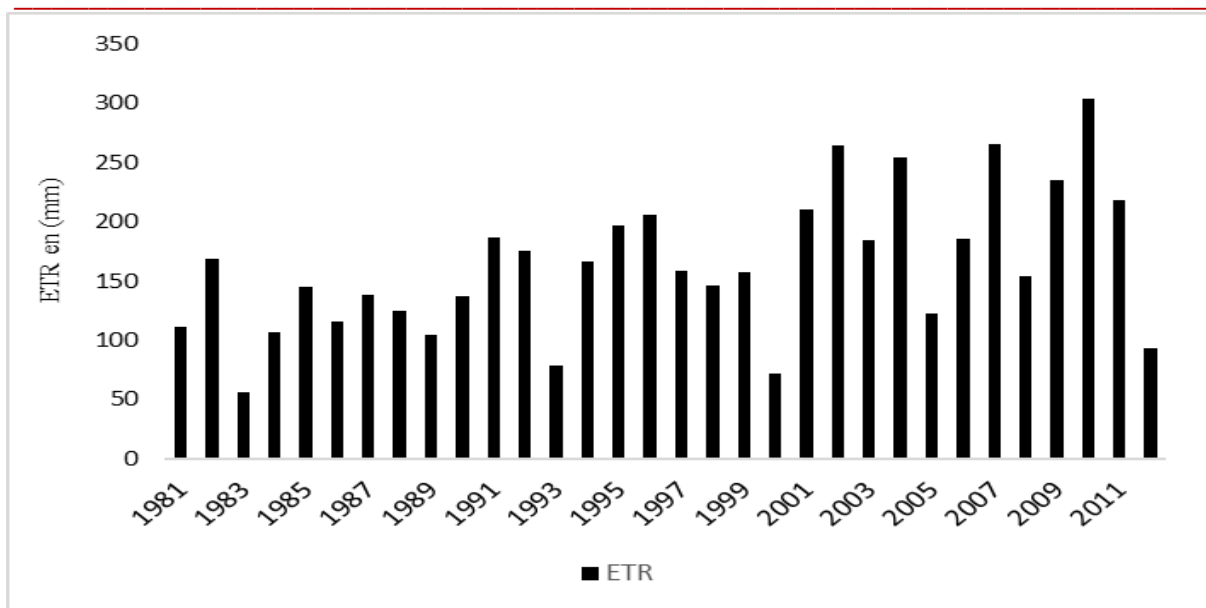
Turc (1961) a proposé une méthode pour la quantification de l'évapotranspiration réelle (ETR) basée sur les précipitations cumulées annuelles et la température moyenne annuelle. Elle s'écrit comme suite :

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

Avec  $P$  : précipitation annuelle ;  $L = 300 + 25T + 0,0573 = 780,0$  ;  $T$  : température moyenne annuelle ( $T = 19,2^\circ\text{C}$ )

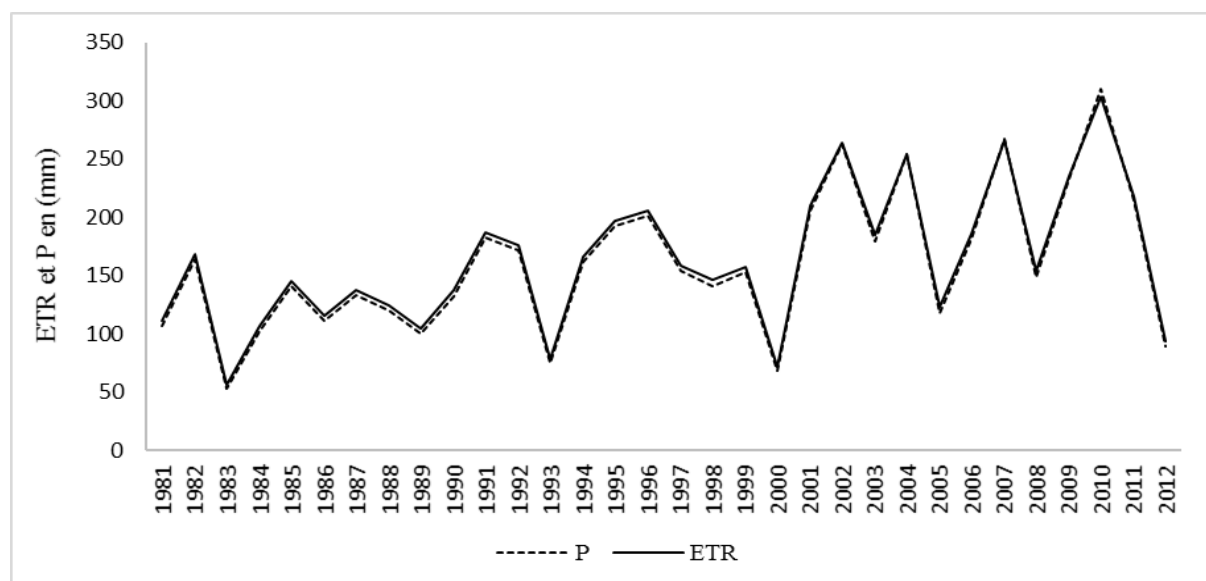
Quant à nous, cette méthode est la plus utile. Sachant que les données que nous avons sont seulement, les précipitations et les températures.

Les résultats présentés dans la figure 65 montrent une importante irrégularité interannuelle des valeurs de l'ETR. Cette dernière est liée à l'irrégularité des précipitations et des températures moyennes d'une année à l'autre.



**Figures 65 : Variabilité interannuelle de l'évapotranspiration réelle ETR entre 1980/1981 et 2011/2012 estimée par la méthode de Turc (1961).**

Au niveau de la station de Guercif, les valeurs de l'ETR théoriques estimées sont équivalentes celles des précipitations annuelles (Fig. 66). Ces résultats confirment ceux du bilan de Thornthwaite, ETP est supérieur à P alors  $ETR = P$ .



**Figures 66 : Variabilité annuelle d'ETR et de P entre 1980/1981 et 2011/2012**

Ce travail statistique a été complété par les résultats d'enquête de terrain. Ce dernier qui vise la perception de la population vis-à-vis des changements climatiques. Les résultats obtenus montrent que le changement climatique est devenu une réalité évidente et perceptible à l'œil chez les agriculteurs. En effet, 78% les enquêtés pensent que le climat a été changé

pendant ces dernières années. Ils sont conscients des effets du changement du climat sur leur production et sur le futur de leurs activités économiques.

La compréhension des origines de ce phénomène pour la population varie d'une personne à une autre selon le niveau d'instruction, l'âge, le suivi des médias.... Dans ce contexte, les activités anthropiques sont l'origine principale de ces nouveaux changements pour 47% des agriculteurs. Par contre, 35% pensent qu'il s'agit d'un changement lié à un processus naturel. Les 18% restant disent que ce changement climatique est le résultat d'interaction des deux facteurs.

Ce phénomène se manifeste par une augmentation des températures pour 76% des enquêtés, une diminution des précipitations pour 86% (cette diminution qui est observée au cours de la saison hivernale et printanière), une perturbation des saisons et une arrivée précoce de l'été pour 64%, des sécheresses récurrentes pour 82% (avec une disparition totale d'agriculture Bour en aval), des fortes précipitations et des inondations pour 48% (ce phénomène est observé plus par les agricultures qui pratiquent leurs activités sur les terrasses fluviales des cours d'eau).

58% de la population ciblée expriment que ce changement de climat est apparu entre les 10 et les 30 dernières années. En revanche, 24% disent qu'il est observé avant (entre 30 et 50 ans).

Nous avons également posé une question sur les problèmes environnementaux qui existent dans et qui pourraient s'aggraver à cause des changements climatiques. Les réponses deviennent comme suite : la sécheresse pour 94% des enquêtés, le manque d'eau pour 69%, les inondations pour 36% et l'érosion pour 26%.

### **Conclusion du chapitre**

Dans ce chapitre, une analyse détaillée des paramètres climatiques a été réalisée. Le climat du bassin versant de l'oued Melloulou est de type semi-aride en amont à aride en aval. Les précipitations et la température se caractérisent par une forte variabilité spatiotemporelle avec des fluctuations remarquables autour des valeurs moyennes. Cela est justifié en premier lieu par la variation du relief et l'exposition des versants de l'amont vers l'aval et par l'irrégularité temporelle des précipitations d'une année à une autre, en seconde lieu.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

Les principales conclusions tirées de l'analyse statistique des paramètres climatiques sont :

- ✓ Une tendance généralisée vers l'augmentation des précipitations cumulées annuelles. Cette dernière est significative plus en aval qu'en amont. Ainsi que des points de changements ont été détectés vers la fin des années 1990 et le début des années 2000;
- ✓ Une tendance significative vers le haussement au niveau des séries de la saison automnale et une autre vers la diminution sans qu'elle soit significative pour le mois d'avril. Les points de changement les plus significatives ont été observés également en automne;
- ✓ Les températures moyennes maximales ont présenté une tendance statistiquement significative vers l'augmentation. La même allure est observée au niveau des séries des températures moyennes. Un point de changement de tendance a été détecté en 1993;
- ✓ La tendance vers la hausse a touché surtout les températures d'été;
- ✓ L'analyse des données journalières montre une tendance vers l'augmentation des jours présentant des précipitations fortes et exceptionnelles et de l'indice d'intensité pluviométrique;
- ✓ Le nombre des nuits chaudes par année a diminué, alors que le nombre de jours avec une température maximale supérieure ou égale à 25°C a significativement augmenté;
- ✓ L'évapotranspiration potentielle estimée est strictement supérieure aux précipitations cumulées enregistrées au niveau de toute la série traitée.
- ✓ Ces conclusions auront sans doute un impact significatif sur le fonctionnement hydrologique du bassin de l'Oued Melloulou.

Ainsi, pour tester l'influence de ces changements du climat sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Oued Melloulou, nous avons analysé selon les mêmes méthodes statistiques les séries hydrométriques disponibles. Cette étape fera l'objet du chapitre suivant.

**CHAPITRE III :**  
**VARIABILITE HYDROLOGIQUE DE L'OUED MELLOULOU ET PHASES**  
**HYDROLOGIQUES EXTREMES**

---

**Sommaire**

---

Introduction du chapitre.....	133
1 Données hydrométriques.....	133
2 Analyse des modules annuels des débits.....	136
3 Régimes hydrologiques des débits.....	149
4 Phases hydrologiques.....	161
5 Variabilité spatiale des écoulements dans le bassin versant.....	190
6 Lac de Tameda : un barrage naturel alimentant le réservoir hydrogéologique.....	205
Conclusion du chapitre.....	209

## **Introduction du chapitre**

Le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Oued Melloulou est le résultat de l'interaction des facteurs physiques entre eux, analysés préalablement, ainsi qu'avec d'autres liés à l'aménagement du territoire. Dans ce chapitre nous nous focaliserons sur la détermination de la variabilité spatiotemporelle des ressources en eau. La variabilité d'écoulement dépend du régime hydrologique du cours d'eau principal et de ses affluents.

L'analyse des chroniques des débits enregistrés dans différentes stations hydrométriques qui sont situées dans le bassin reflète plus ou moins ce comportement hydrologique et met en évidence les divers aspects de l'écoulement. De ce point de vue, ces données hydrométriques seront exploitées pour visualiser ce comportement hydrologique.

Cependant, la couverture du bassin versant de l'oued Melloulou en stations de mesures est faible ; seules 3 stations sont disponibles. Pour contourner de cette lacune, le recours à la mesure des écoulements sera un moyen indispensable. Dans ce contexte, plusieurs campagnes de jaugeages ont été effectuées sur les périodes des basses et des hautes eaux, entre 2016 à 2018. Les données mesurées sur le terrain ont été utilisées en premier lieu pour suivre l'évolution du débit des oueds de l'amont vers l'aval. En seconde lieu, ces dernières données sont destinées pour la spatialisation des rendements et calculer les débits spécifiques des sous bassins. Ces mesures permettent également la compréhension des facteurs physiques et anthropiques interviennent dans la variation de débit le fonctionnement hydrologique de l'oued Melloulou et ses affluents.

## **1 Données hydrométriques**

### **1.1 Stations hydrométriques installées dans le bassin**

Grâce à un réseau hydrographique plus ou moins développé, l'Oued Melloulou draine une vaste zone. Pourtant, son débit n'est mesuré qu'en 3 stations hydrométriques ; deux situées au niveau de la plaine de Guercif (Belfarah et Guercif) et la 3<sup>ème</sup> située en amont sur l'Oued Zebzit (la station de Berkine).

La station de Guercif, à l'origine, était installée par le service des Travaux Publics en 1927. A cette époque elle ne disposait que d'un limnigraphe et d'une station de mesure au flotteur. En 1952, une station de mesure à câble a été installée puis reconstruite en 1956. Actuellement, la station est gérée par l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya dont le siège administratif est à Oujda.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

La station de Belfarah était au début une station d'annonce de crues. Installée en 1961, elle n'a pu faire d'observations hydrométriques régulières qu'à partir de 1971 (Mouhdi, 1993).

### 1.2 Séries des données hydrométriques disponibles

Les séries de données des trois stations sont disponibles sur une période de 25 ans de 1990/1991 jusqu'à 2014/2015. Ces données proviennent de l'archive de l'Agence du Bassin Hydraulique de Moulouya (Tab. 48).

Bien que les chroniques des données soient complètes, les jaugeages des débits comportent une marge d'erreur assez importante. L'instabilité du lit des cours d'eau influence les mesures, notamment en période des basses eaux dont l'écoulement se réduit à quelques chenaux instables. Ainsi, une partie des apports du Melloulou s'écoulent dans les alluvions accumulées sur les lits. Finalement, l'absence d'une maintenance de la section de jaugeage au niveau des stations hydrométriques peut fournir des résultats douteux. Pour ces raisons, nous avons fait appel aux méthodes d'homogénéisation des données utilisées dans le chapitre traitant les données climatiques.

**Tableau 48 : Séries de données hydrométriques utilisées**

Station	Période d'observation	Longitude	Latitude	Altitude en (m)	Module interannuel (m <sup>3</sup> /s)	Ecartype (m <sup>3</sup> /s)	C.V en (%)	Superficie du bassin contrôlée (km <sup>2</sup> )
<b>Berkine</b>	1990 - 1991 / 2014 -2015	-3.800355	33.784250	1300	1.43	1.42	0.99	532
<b>Belfarah</b>	1991 - 1991 / 2014 -2015	-3.671493	34.120230	600	7.09	6.02	0.85	2225
<b>Guercif</b>	1992 - 1991 / 2014 -2015	-3.357603	34.219654	360	8.13	7.07	0.9	2563

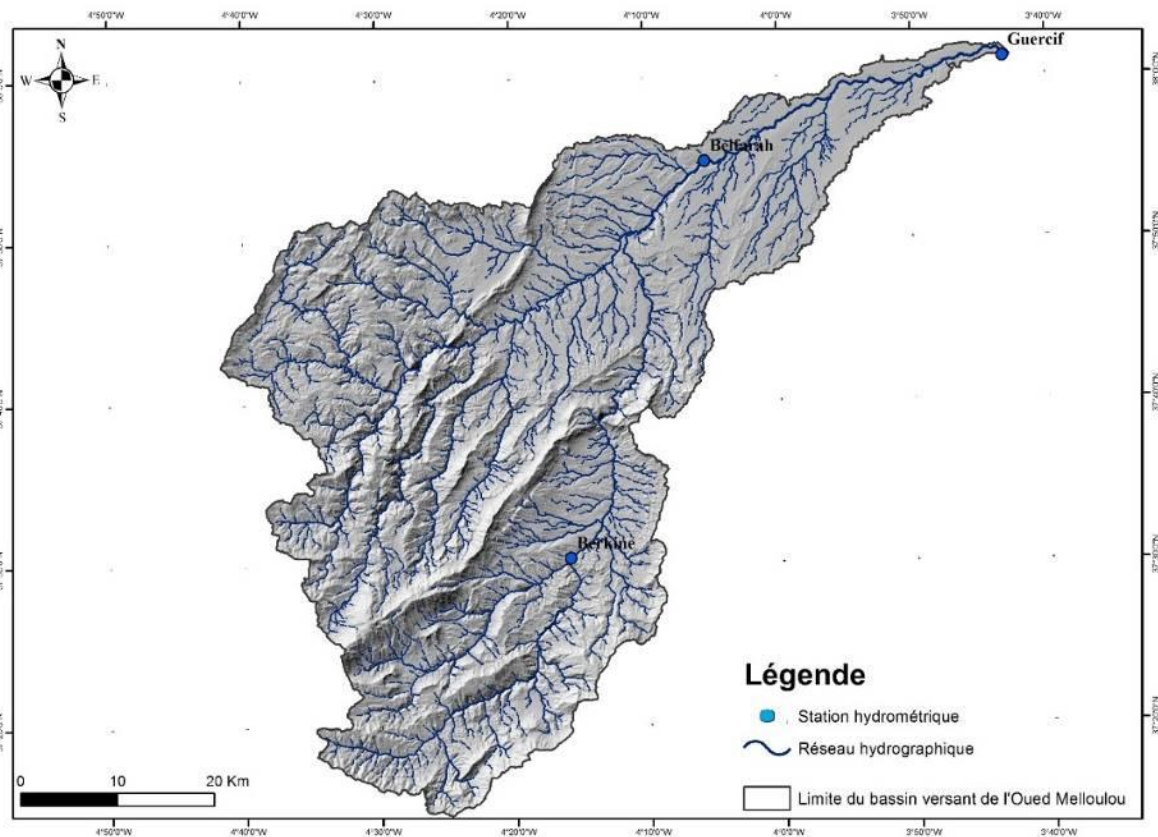
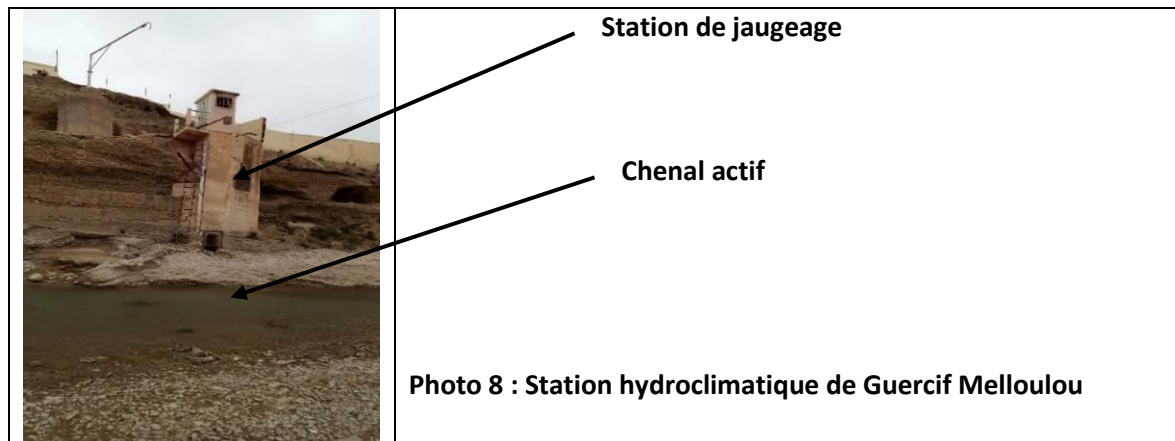


Figure 67 : Situation géographique des stations hydrométriques dans le bassin versant de l'Oued Melloulou

L'application de la méthode des simples cumuls affiche deux cassures au niveau des séries de données hydrométriques ; la première en 1995/1996 et la seconde en 2007/2008. Ces ruptures sont généralisées au niveau des trois stations utilisées ce qui montre qu'il s'agit peut-être d'un changement dans le régime hydrologique au niveau du bassin versant (Fig. 68).

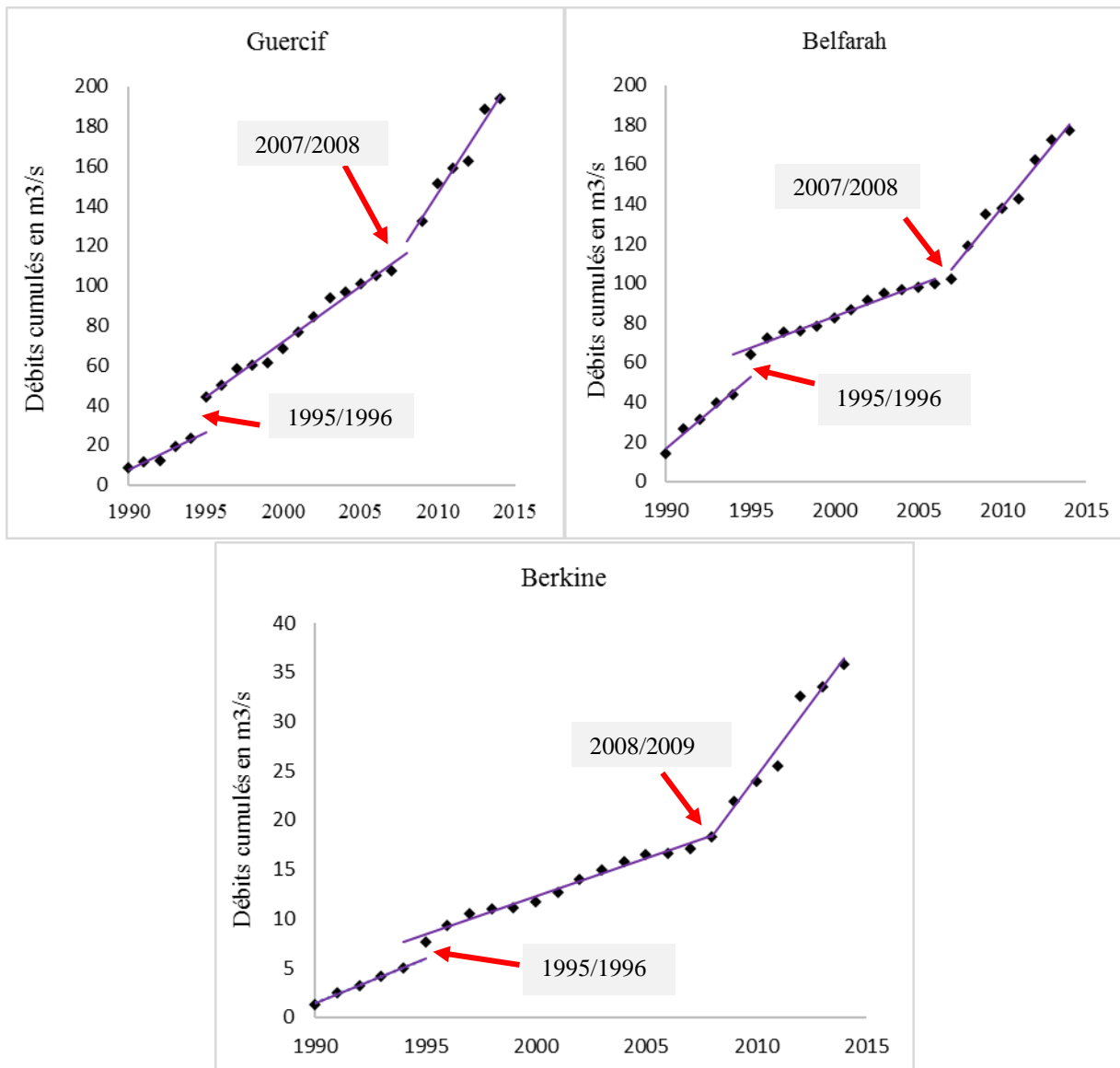


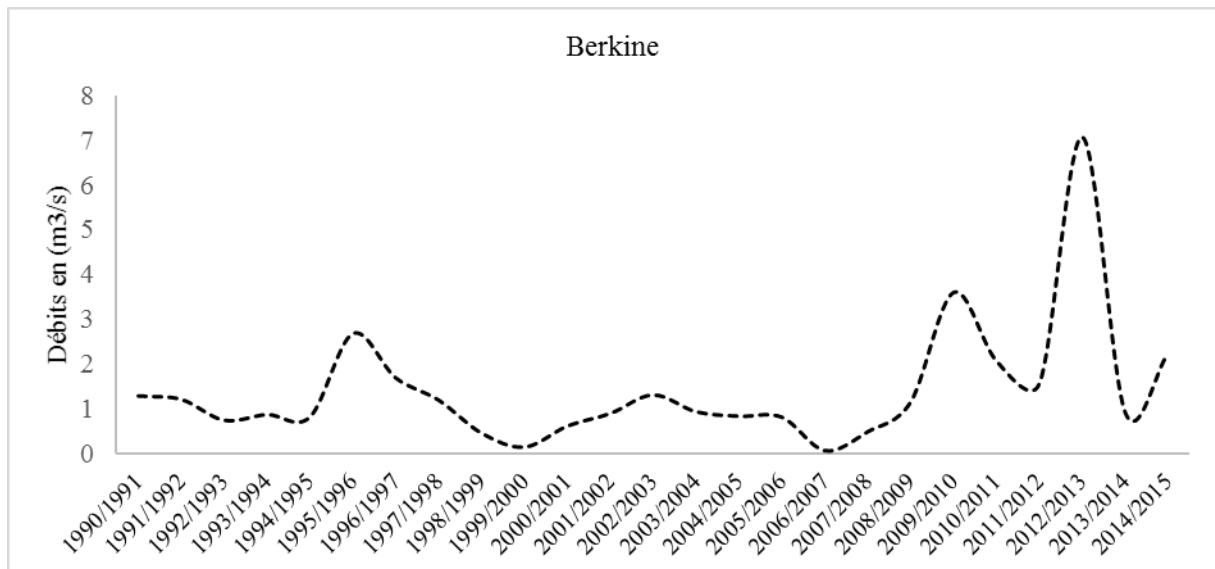
Figure 68 : Méthode des simples cumules appliquée aux données hydrométriques ; 1990/1991-2014/2015

## 2 Analyse des modules annuels des débits

On utilise le débit moyen (module en hydrologie) pour exprimer la quantité d'eau d'un fleuve ou d'une rivière, écoulee pendant une période donnée (Obda, 2004 et Assani, 2004). L'étude statistique des modules hydrologiques d'un bassin versant reflète la variation et le fonctionnement hydrologique temporel de ce dernier. Dans le même bassin versant, les irrégularités temporelles des débits dépendent essentiellement des variations aléatoires de la variable d'entrée (précipitations) d'une année à une autre. Par ailleurs la variabilité spatiale est liée à la situation du site du jaugeage, situation amont-aval dans le bassin.

Sur la période de 1990/1991 à 2014/2015, les modules annuels calculés au niveau des stations de Berkine, Belfarah et Guercif sont respectivement de 1.43, 7.09 et 8.13 m<sup>3</sup>/s. Les modules annuels augmentent de l'amont vers l'aval en fonction de la superficie du bassin contrôlée par la station de jaugeage. En effet la valeur la plus haute est de 8.13 m<sup>3</sup>/s, enregistrée au niveau de la station de Guercif. Cette dernière située à l'exutoire, contrôle par la suite tout le bassin versant. Alors que le module annuel des débits calculés au niveau de la station de Berkine ne dépasse pas 1.5 m<sup>3</sup>/s. Cette dernière collecte les eaux d'un sous-bassin versant de 532 km<sup>2</sup> (Fig. 69).

Ainsi, les valeurs élevées des coefficients de variations estimés pour l'ensemble des séries de données montrent une forte variabilité temporelle des débits de l'Oued Melloulou. Cette variabilité est liée à l'irrégularité interannuelle des précipitations et par la suite au rendement des sources en amont.



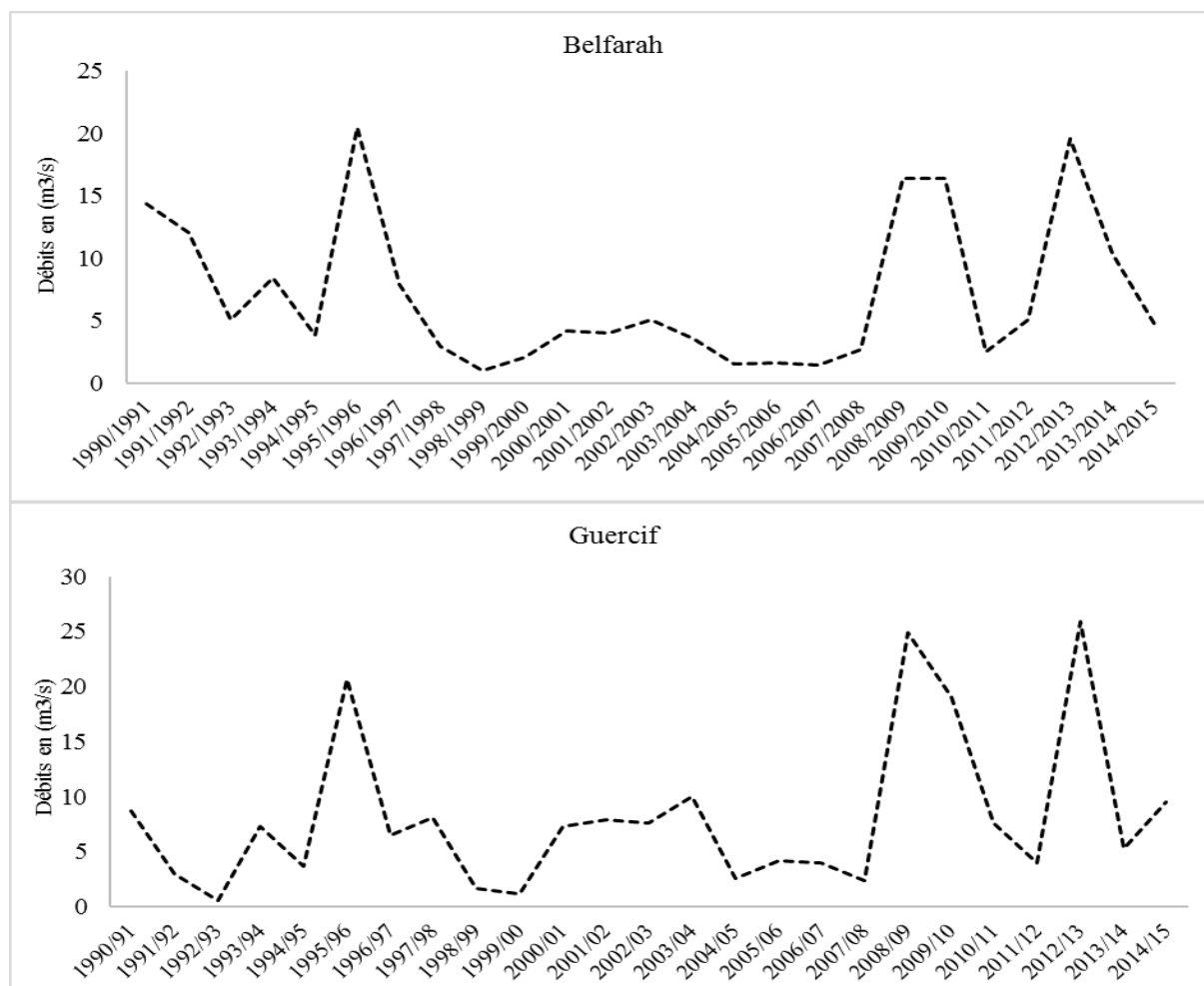


Figure 69 : Variabilité temporelle des modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.

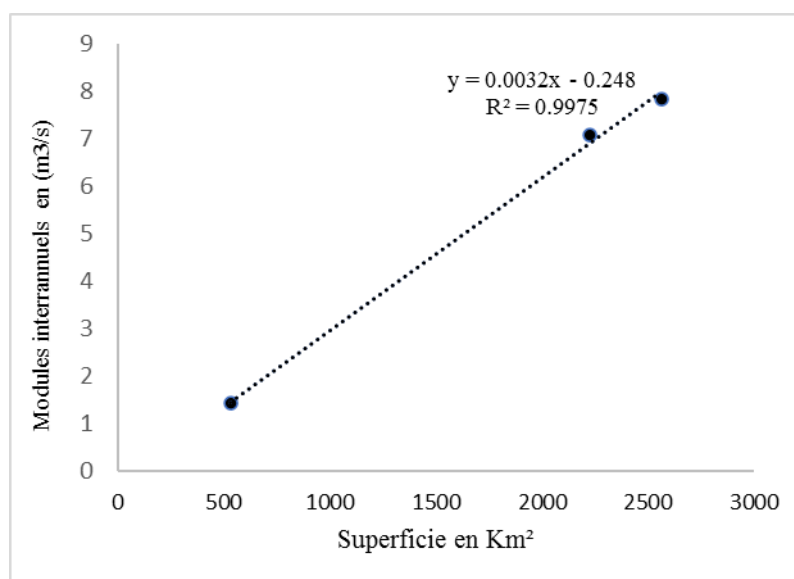


Figure 70 : Variabilité spatiale des modules interannuels des débits selon la superficie du bassin contrôlée (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.

Pour bien déceler cette variabilité temporelle des débits au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, plusieurs méthodes statistiques ont été appliquées :

### **2.1 Méthode des écarts à la moyenne.**

La méthode des écarts à la moyenne (E) est largement utilisée dans les études hydroclimatiques. Cette approche statistique, basée sur des écarts des débits moyens annuels au débit moyen interannuel, est adéquate pour mettre en évidence les fluctuations hydroclimatiques. Une année peut être qualifiée normale si l'écart à la moyenne est proche de 0. Nous dirons qu'une année est normale si cet écart est compris entre -0.1 et +0.1 (déficit ou excédent inférieur à 10%). L'année est considérée déficitaire lorsque E est inférieur à -0.1 et excédentaire lorsque E est supérieur à +0.1 (Albergel, J et al, 2001).

La figure 71, relève une répartition hétérogène des modules annuels pour l'ensemble des stations. Ils montrent ainsi l'irrégularité temporelle des débits. En général les histogrammes des écarts à la moyenne montrent 2 découpages avec une alternance des séquences sèches et humides :

Sauf l'année hydrologique de 1995/1996, une période déficitaire s'étend généralement de 1991/1992 jusqu'à 2007/2008. Les modules calculés sur cette phase sont de 5.96, 4.94 et 0.95 m<sup>3</sup>/s à Guercif, Belfarah et Berkine respectivement. Cette période coïncide avec une période pluviométrique plus ou moins déficitaire (Tab. 49).

La période qui s'étale de 2008/2009 jusqu'à la fin des séries est globalement excédentaire, avec des modules élevés. Ils sont de 13.73, 10.71 et 2.67 m<sup>3</sup>/s calculés, respectivement à Guercif, Belfarah et Berkine. Cette augmentation des modules annuels coïncide avec un retour de la pluie dans le bassin (Tab. 49).

Sur une chronique de 25 ans, le pourcentage des années déficitaires oscille entre 64 et 72 %, alors que le pourcentage des années humides est inférieur à 36 %. La longueur d'une séquence sèche successive est assez importante. Il oscille entre 6 ans au niveau de la station de Guercif et 12 à Berkine (Tab. 49).

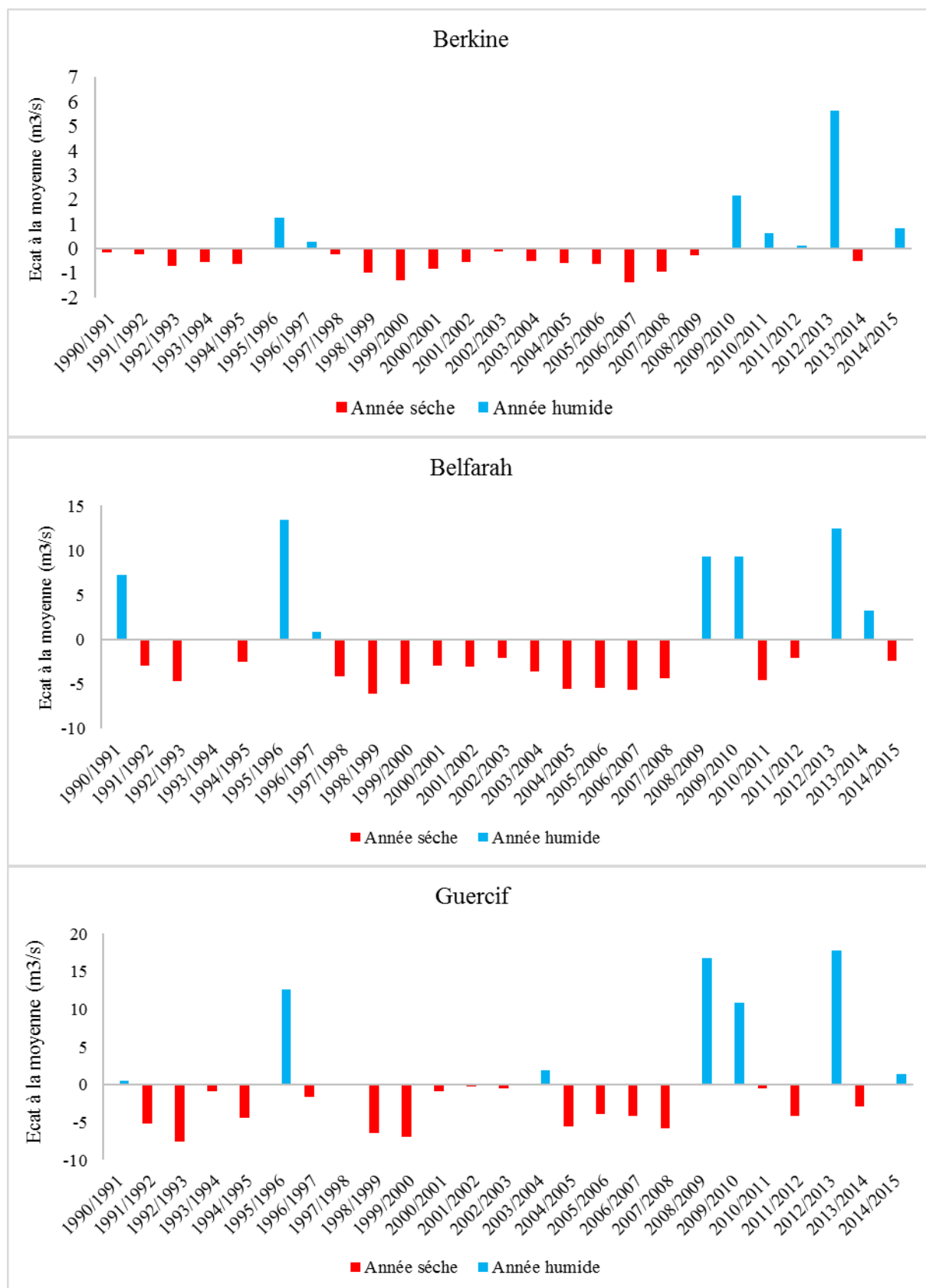


Figure 71 : Méthode des écarts à la moyenne des modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.

**Tableau 49 : Pourcentages des années déficitaires et excédentaires issues de la méthode des écarts à la moyenne**

Station	Année déficitaire	Année normale	Année de surplus	Duré de séquence sèche
Berkine	18 (72%)	0	7 (28%)	12
Befarah	16 (64%)	0	9 (36%)	11
Guercif	17(68%)	1 (4%)	7 (28%)	6

## 2.2 Méthode de CUSUM

La méthode du CUSUM est issue de la méthode du simple cumul. L'application de cette méthode permet de tester si la série est stationnaire sur la durée d'une chronique (Brunet – Moret, 1971; Lettenmayer, 1976, Qadem,2015), permettant ainsi de vérifier l'homogénéité des chroniques des stations entre elles et d'illustrer les tendances humides et sèches du climat. La valeur  $C_j$  est calculée pour chaque année :

$$C_j = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})$$

Où  $x_i$ ,  $\bar{x}$  et  $n$  correspondent respectivement au module annuel des débits, la moyenne de la période étudiée et  $n$  le nombre d'année jusqu'à l'année  $i$ .

La courbe de CUSUM peut être obtenue directement à partir des cumuls des écarts à la moyenne, où les portions de droite à pente positive indiquent une tendance humide, et les portions de droite à pente négative traduisent une tendance sèche (El Fella et al., 2017).

Les résultats issus de cette méthode montrent une tendance vers le sec des débits depuis 1993/1994 jusqu'à l'année de 2007/2008 (Fig. 72). Ce résultat a été cité également par Qadem (2015) sur les données du bassin de Haut Sebou. Après cette date, les séries des débits moyens ont commencé à augmenter jusqu'à 2015.

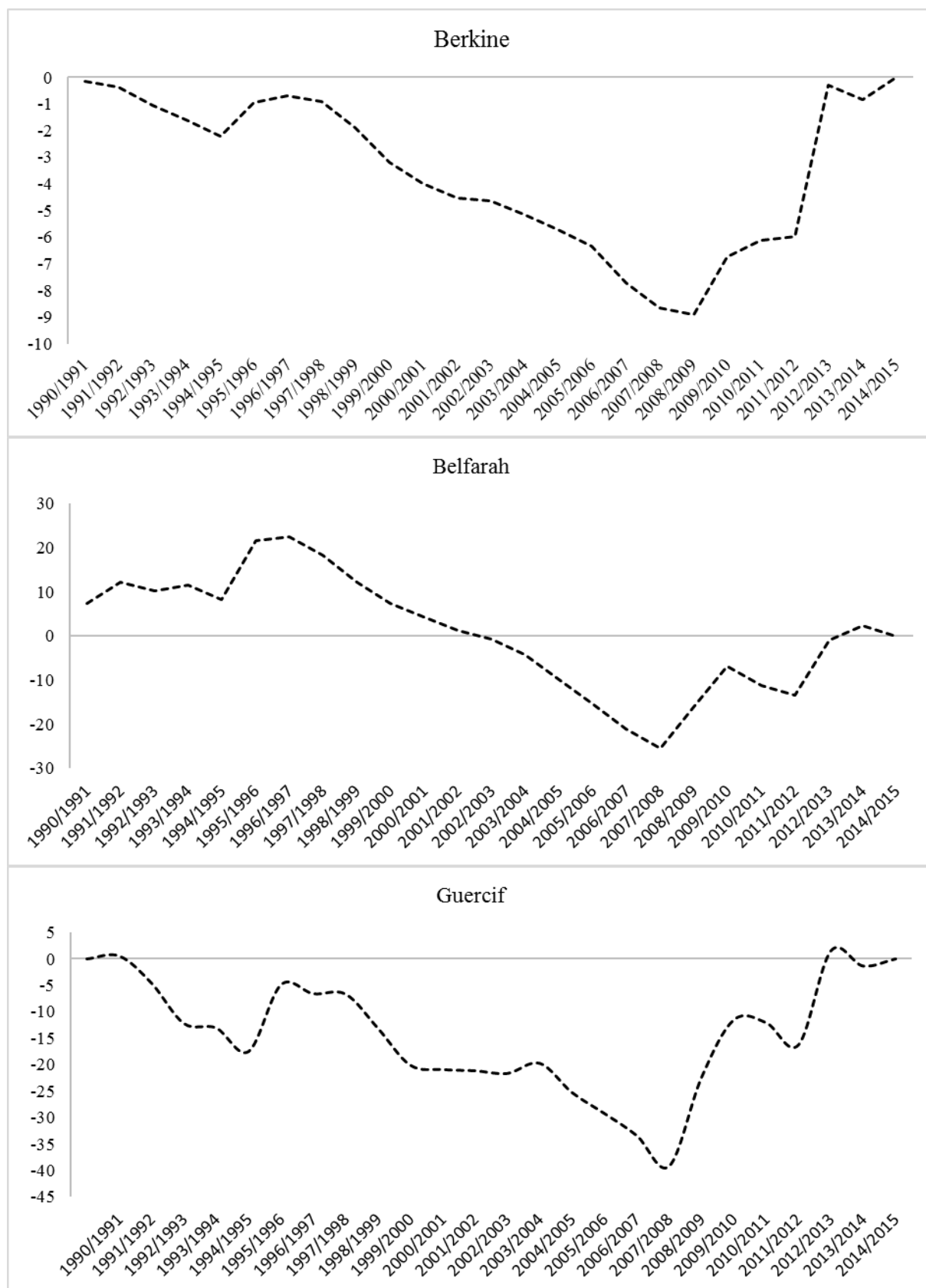


Figure 72 : Méthode de CUSUM appliquée aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.

### 2.3 Coefficient d'Hydraulicité

C'est le rapport du module d'une année donnée ( $Q_i$ ) divisé par le débit moyen d'une longue série d'observations ( $Q_{moy}$ ). Il exprime le caractère humide ou sec de l'année hydrologique. Pour un coefficient ( $CH > 1$ ), on est dans une année humide à écoulement important. Dans le cas inverse, c'est une année à faible hydraulicité, c'est-à-dire de faible débit du cours d'eau.

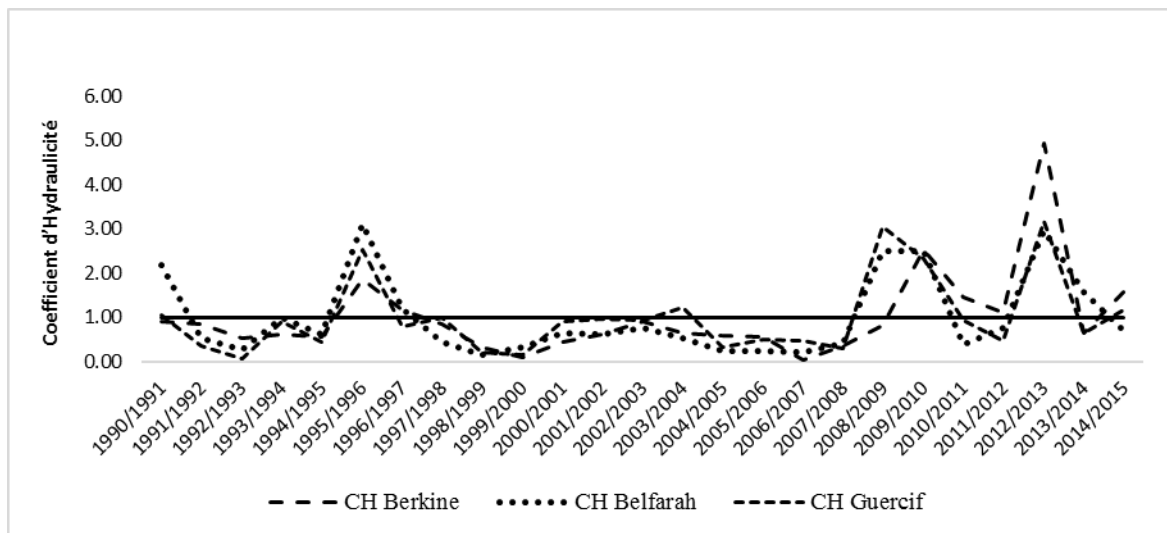


Figure 73 : Coefficient d'hydraulicité appliqué aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.

Les résultats de l'indice d'hydraulicité montrent que sur une période de 25 ans, 72% des années sont sèches pour l'ensemble des stations étudiées avec un coefficient d'hydraulicité inférieur à 1. Seules 7/25 ans sont considérées humides, soit 28%.

Les années les plus sèches sont : l'année 1999/2000 avec un coefficient de 0.1 au niveau de la station de Berkine, 0.32 à Belfarah, et de 0,14 à la station de Guercif (Fig. 73).

### 2.4 Coefficient d'immodération

Le coefficient d'immodération est défini comme étant le rapport des modules extrêmes ( $CI = Q_{max}/Q_{min}$ ). Cet indice révèle l'importance de l'irrégularité des débits moyens d'une année à une autre.

Les valeurs de ( $C_i$ ) calculées sont de 106, 23 et 49 pour les stations de Berkine, Belfarah et Guercif respectivement. Elles sont supérieures aux modules annuels maximaux, reflétant une forte irrégularité des débits.

## 2.5 Détection des ruptures

Pour une étude visant la planification des ressources en eau, il est d'une grande importance d'évaluer la cohérence et l'homogénéité des données hydrométriques entre les stations (Adeloye & Montaseri, 2002). La cohérence indique que toutes les données appartiennent à la même population statistique. Cependant, cette hypothèse peut ne pas être correcte comme indiqué dans un ensemble de travaux publiés. Les séries de données hydrologiques dans de nombreuses régions démontrent une non-cohérence en raison de l'influence du changement climatique et / ou des activités humaines sur les ressources en eau. Cela signifie l'existence d'un ou plusieurs points de changement dans les séries de données observées

Les trois méthodes de détection des ruptures, citées dans le chapitre II, ont été appliquées aux séries de données hydrologiques disponibles. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 50 : Débits moyens avant et après les ruptures**

	Date de rupture	Moyenne avant la rupture en (m <sup>3</sup> /s)	Moyenne après la rupture en (m <sup>3</sup> /s)	Surplus en (m <sup>3</sup> /s)
Berkine	2009	1	2.8	1.8
Belfarah	2008	5.7	10.7	5
Guercif	2007	5.96	13.73	7.77

Les résultats obtenus montrent que les trois séries présentent un seul point de changement. Les dates des ruptures ne sont pas semblables pour l'ensemble des stations, mais elles sont très proches ; comprises entre 2007 et 2009. La significativité des ruptures est assez faible, elle est de 90%, c'est-à-dire une marge d'erreur assez importante proche de 10%. Après ces dates, les modules annuels des débits enregistrés ont augmenté. Le surplus calculé est de 1.8, 5 et 7.8 m<sup>3</sup>/s pour les stations de Berkine, de Belfarah et de Guercif respectivement (Tab. 50).

## 2.6 Etude de tendances hydrologiques des modules annuels

Si l'étude de la cohérence des données est importante dans chaque étude hydrologique, il est également primordial de vérifier la stationnarité des séries de données disponibles, via des tests de tendances. En fait, la présence d'une tendance significative dans une série d'écoulement nous permet de prendre la bonne décision en matière d'aménagement hydraulique et hydroagricole. Les deux tests de Mann-Kendall sont les plus utilisés dans l'évaluation de la stationnarité des données.

### 2.6.1 Résultats du test classique de Mann-Kendall.

Les résultats issus du test classique de Mann-Kendall montrent que les débits moyens annuels dans la totalité du bassin versant de l'Oued Melloulou ont une tendance strictement positive. Ces dernières sont, par ailleurs non significatives. La pente de Sen révèle une augmentation annuelle maximale de 0.19 m<sup>3</sup>/s/an à Guercif, de 0.001 m<sup>3</sup>/s/an à Belfarah et de 0.028 m<sup>3</sup>/s/an à Berkine (Tab. 51). Cette évolution est en relation avec les apports des sources situées en amont, ainsi qu'avec la quantité de la neige tombée sur les sommets montagneux. Elle est également cohérente avec les données pluviométriques qui marquent un retour important de la pluie pendant ces dernières années.

**Tableau 51 : Résultats du test de Mann-Kendall et de la pente de Sen, appliqués aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.**

	Valeur Z de Mann-Kendall	Rupture au seuil 5 %	La pente de Sen
Berkine	1	Non significative	0.028
Belfarah	0.54	Non significative	0.001
Guercif	1.24	Non significative	0.19

### 2.6.2 Test séquentiel de Mann-Kendall

Le test séquentiel de Mann-Kendall est une méthode efficiente qui permet d'identifier le début d'une tendance. Il permet également de détecter le moment approximatif de l'apparition d'une tendance à partir du point d'intersection des courbes normale  $U(t)$  et rétrograde  $U'(t)$  de la statistique du test. Si le point d'intersection située hors les deux bornes de confiance, alors le point critique du changement est à cette date, (Moraes et al., 1998). Ce test est largement utilisé dans la littérature hydroclimatique (Douglas et al., 2000, Huang et al., 2014. Ouarda et al., 2014. Zhu et al., 2005. Batisani et al., 2010 ...).

Sauf pour la station de Belfarah qui subit une diminution significative entre 1998 et 2008, la figure 74 ne montre aucune tendance statistiquement significative. Un petit retour vers les valeurs positives des courbes  $U(t)$  est observé depuis 2008. Ainsi, les intersections des courbes  $U(t)$  et  $U'(t)$  sont toujours entre les deux bornes du test, ce qui montre l'absence d'un point de changement de tendance significatif.

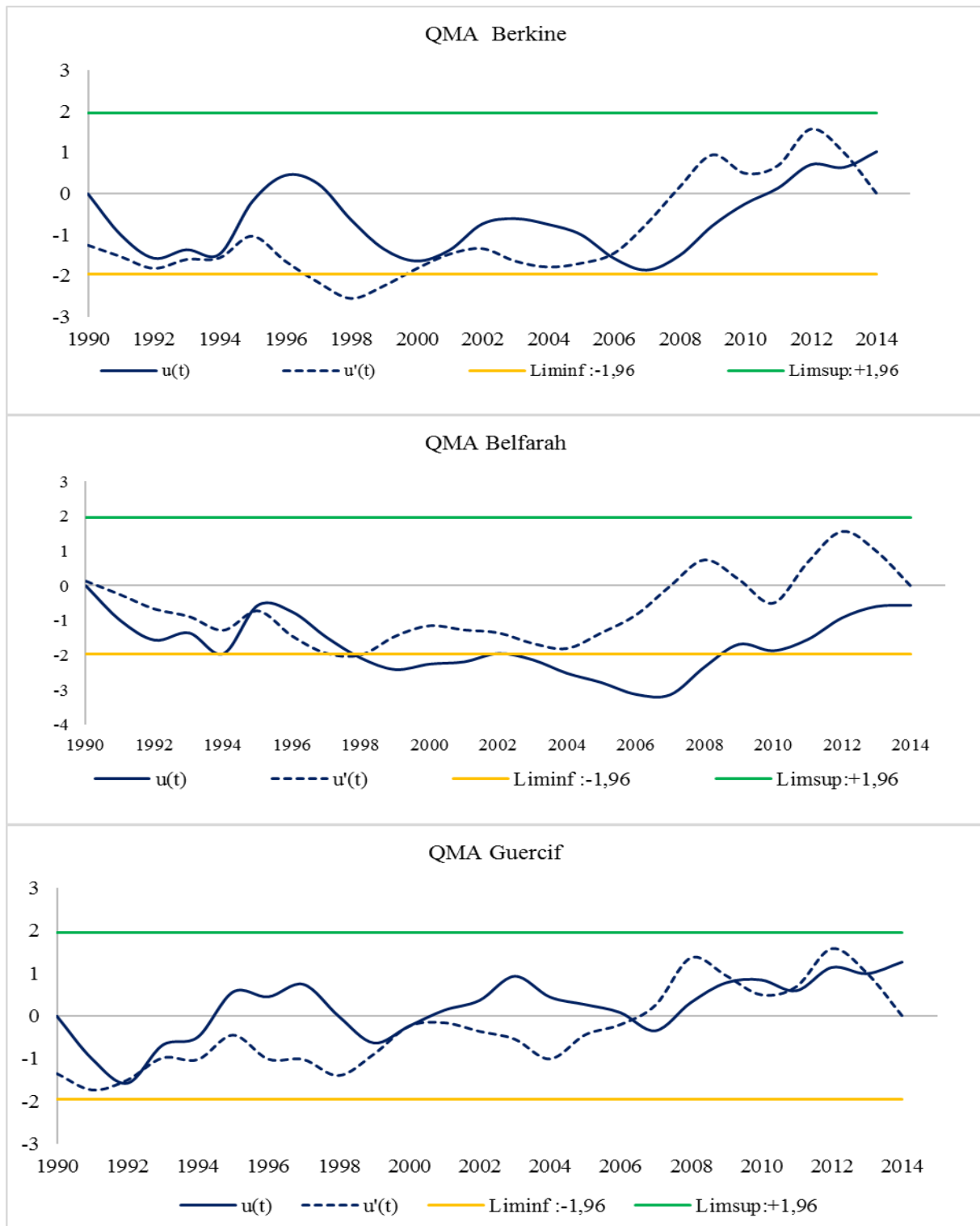


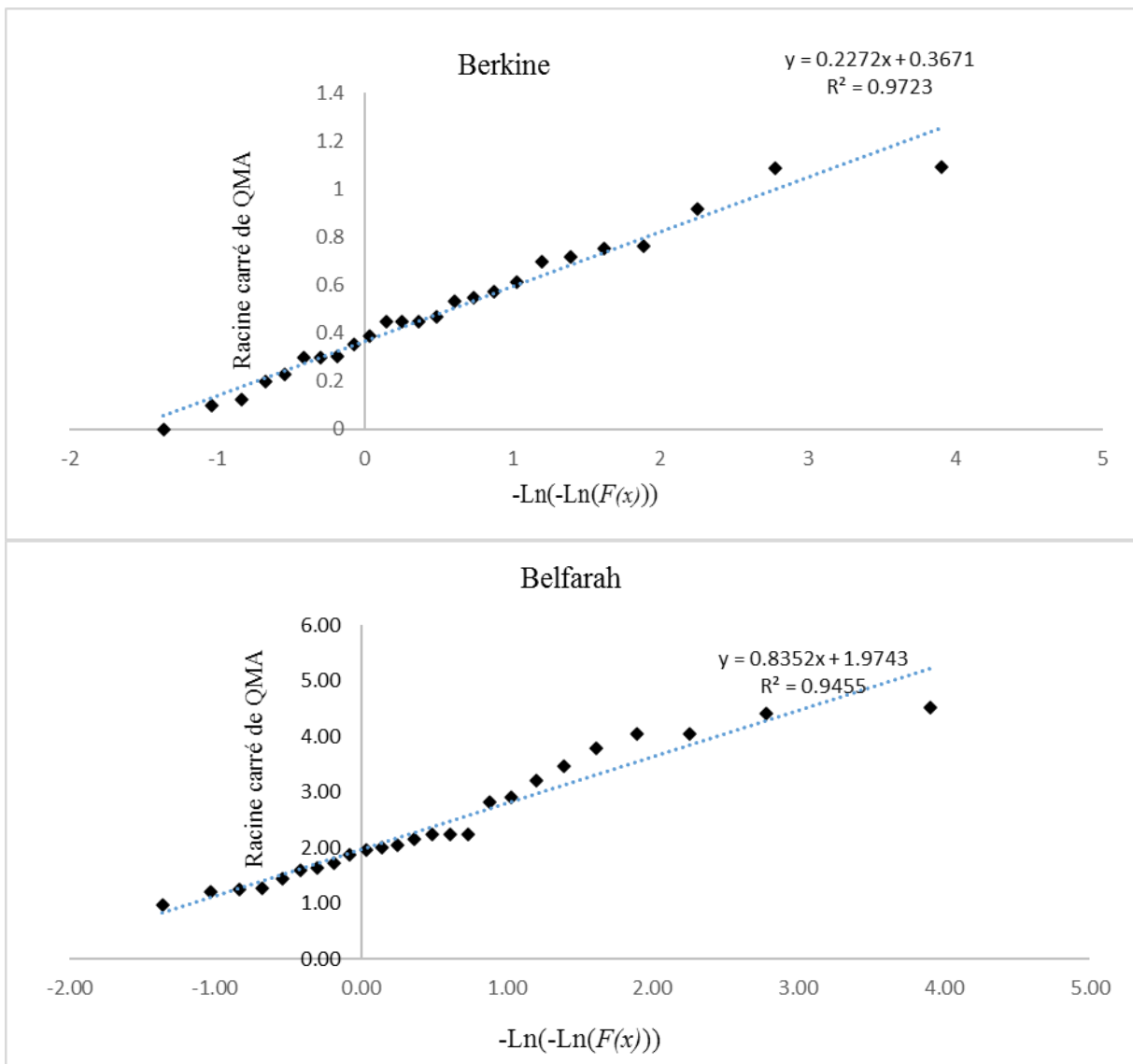
Figure 74 : Tracés du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.

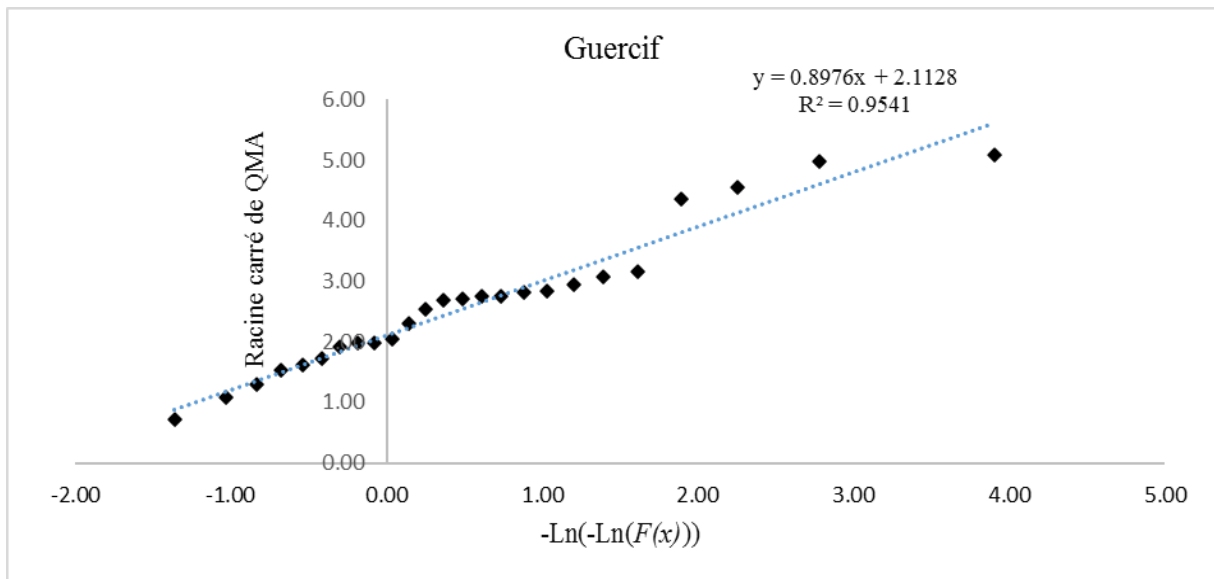
## 2.7 Analyse fréquentielle des modules annuels

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné hydroclimatique, afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Le but de l'étude fréquentielle des débits annuels est

d'estimer les valeurs pouvant être atteintes pour différentes périodes de retour. Cela permet, en effet, une connaissance et une bonne gestion des ressources en eaux (Obda, 2004 et Mouhdi, 1993).

Plusieurs lois ont été testées pour déterminer celle qui s'ajuste au mieux avec les modules hydrologiques annuels des stations de Berkine, Belfarah et Guercif. Sur la période 1990-2015. Après plusieurs tests, à base du test de  $kh^2$ , c'est la loi racine Gumbel qui est la plus adaptée aux données disponibles (Fig. 75).





**Figure 75 : Ajustement des données hydrométriques à la loi racine Gumbel**

**Tableau 52 : Débits estimés selon les temps de retour choisis par la loi racine Gumbel**

Temps de retour (ans)	5	10	20	50	75	100
Qp pour période de retour T Berkine (m <sup>3</sup> /s)	0.51	0.79	1.11	1.61	1.85	2.04
Qp pour période de retour T Belfarah (m <sup>3</sup> /s)	10.43	14.90	19.94	27.54	31.26	34.04
Qp pour période de retour T Guercif (m <sup>3</sup> /s)	11.97	17.10	22.88	31.60	35.88	39.06

Les modules annuels estimés en utilisant le modèle racine-Gumbel pour un temps de retour centennal montrent un écoulement plus ou moins faible. En effet, ces derniers ne dépassent pas 40 m<sup>3</sup>/s à l'exutoire (Tab. 52), alors que les débits de pointe dépassent parfois 1300 m<sup>3</sup>/s dans le même site de jaugeage. Pour cette raison, l'analyse fréquentielle des valeurs extrêmes (crues et étiages) peut donner des résultats plus représentatifs qui vont peut-être être exploités dans la prise de décision en matière de gestion des ressources en eau et d'aménagement durable du territoire.

## **2.8 Lambe d'eau écoulée et estimation des pertes**

La lame d'eau équivalente est définie comme la hauteur d'une nappe répartie sur une surface horizontale égale à la surface du bassin (Roche, 1963). L'estimation de cet indice permet de déterminer la proportion de l'écoulement par rapport à la lame d'eau tombée.

En moyenne, presque les trois quarts de la lame d'eau tombée sur le bassin versant de l'Oued Melloulou ne s'écoulent pas. En effet, la quantité la plus élevée d'eau perdue est de 75.37%, estimée à partir des données de Berkine, alors que la plus faible est de 72%, estimée

à partir des données de la station Guercif. En dépit des faibles températures enregistrées en amont par rapport à celles de l'aval, la quantité des pertes est élevée en amont. La perméabilité joue donc le rôle le plus déterminant dans les pertes en eau à l'amont du bassin.

## **2.9 Débits spécifiques**

L'écoulement sur la surface du bassin versant, ou débit spécifique, est exprimé en l/s/km<sup>2</sup>. Cette mesure permet une comparaison entre les cours d'eau et caractérise leurs spécificités. Quant à nous, les faibles valeurs des débits spécifiques calculés (Tab. 53) montrent un faible rendement hydrologique malgré le réseau des sources localisées en amont. Les valeurs estimées au niveau des trois stations hydrométriques sont de 2.7, 2.9 et 3.17 l/s/km<sup>2</sup> (Tab. 53). L'évolution de ce paramètre de l'amont vers l'aval est très réduite par rapport à la superficie du bassin versant. Le substratum lithologique perméable et l'évapotranspiration élevée, ainsi que l'ensemble des prélèvements d'eau pour l'irrigation, peuvent être les principaux facteurs expliquant cette faiblesse de rendement des écoulements.

**Tableau 53 : Lamé d'eau écoulee et estimation des déficits au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou (1990/1991 – 2014/2015)**

	Débits spécifiques (l/s/km <sup>2</sup> )	Lamé d'eau tombée	Lamé d'eau écoulee	Déficits en mm	Déficits en %
Berkine	2.7	341	84	257	75.37
Belfarah	2.9	371.5	100.54	270.96	72.94
Guercif	3.17	357	100.08	256.92	71.97

## **3 Régimes hydrologiques des débits**

Les jaugeages des débits d'un cours d'eau sur une longue période montrent des variations saisonnières systématiques (position des hautes et des basses eaux) en fonction des principaux facteurs influençant l'écoulement (Touazi et al., 2011) : le régime des précipitations, la nature du bassin versant, sa situation géographique, l'infiltration, l'action anthropique, etc.

Le régime hydrologique d'un bassin versant résume donc l'ensemble de ses caractéristiques hydrologiques et son mode de changement. Il se définit par les fluctuations de son débit habituellement représentées par le graphique de l'écoulement saisonnier moyen ou mensuel moyen (qui sont appelé débit "inter-mensuel" ou module mensuel).

### 3.1 Régime saisonnier des débits

A l'intérieur d'une année hydrologique, on peut spécifier la répartition de l'écoulement entre les saisons. Sur une longue série de données, l'année hydrologique subdivisée en quatre saisons, débute en septembre et se finit en aout (la fin de l'été). Pour ce travail, l'étude de la variabilité saisonnière des débits de l'Oued Melloulou est basée sur les modules mensuels calculés au niveau des 3 stations hydrométriques disponibles.

La figure 76, présente la variation saisonnière des débits au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou. Les résultats affichent trois régimes différents à l'exutoire. Le premier est

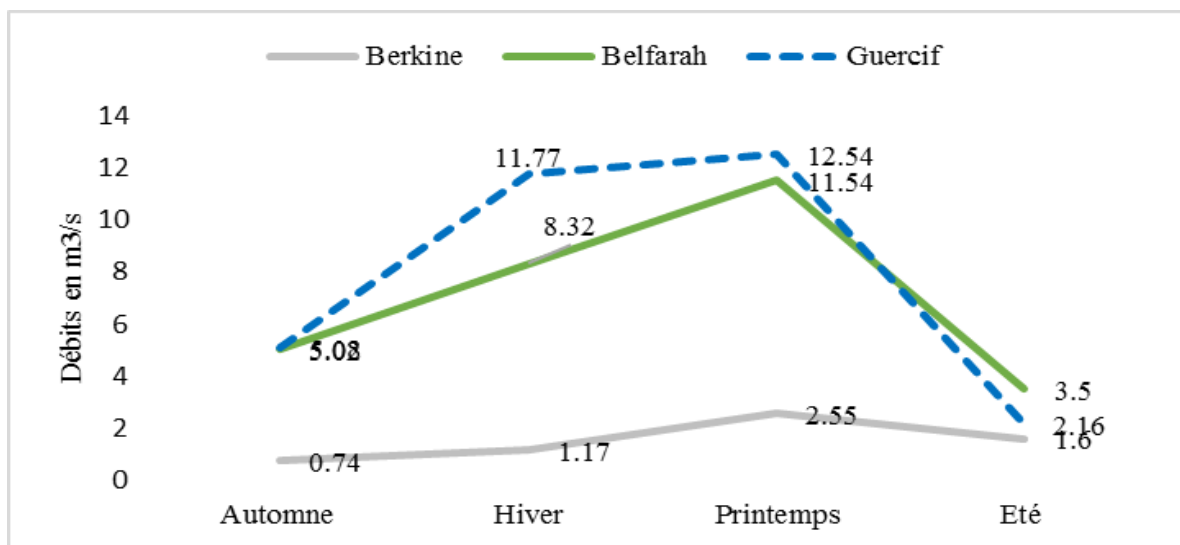


Figure 76 : Régimes saisonniers d'écoulement au niveau du BV de l'oued Melloulou

représenté par une augmentation régulière des débits de l'automne au printemps. Tandis que, la chute de débits intervient entre le printemps et l'été. La station concernée par ce régime d'écoulement est Belfarah. Le deuxième régime aborde une augmentation forte de l'automne à l'hiver, puis un très faible haussement de l'hiver au printemps, et en fin une diminution du printemps à l'été ce régime d'écoulement est observé au niveau de la station de Guercif. Le troisième régime se traduit par une augmentation lente de débit de l'automne au printemps. Le débit reste à peu près important durant l'été, puis diminue fortement vers l'automne. Ce régime d'écoulement est observé à Berkine. Les valeurs élevées des débits enregistrées en été à Berkine sont expliquées par la vidange presque totale de la nappe phréatique vers la fin de l'été et le début d'automne, ainsi que par la fonte de la neige sur les sommets montagneux du Moyen Atlas Septentrional, ce qui alimente les affluents de l'Oued Zebzit.

Les valeurs des modules saisonniers, enregistrées en été au niveau de la station de Belfarah et Guercif, ont bien montré l'effet des prélèvements pour l'irrigation des terres agricoles sur le régime d'écoulement.

### 3.1.1 Détection des anomalies dans les séries saisonnières

Les résultats de la méthode des écarts à la moyenne saisonniers des débits, montrent que le nombre d'années déficitaires est supérieur à celui des années excédentaires. Ce nombre varie d'une saison et selon la station étudiée. En moyenne, le pourcentage le plus élevé des années déficitaires sur la totalité du bassin versant est observé en printemps, il est de 19/25 ans, soit 73%. En été, le nombre d'années déficitaires est de 17/ 25 ans, soit 70 % (Tab. 54). Les pourcentages des années de déficit hydrique, calculés en automne et en hiver sont de 64 et 65% respectivement. Ces résultats sont presque similaires entre les stations étudiées. Une augmentation observée de nombre d'années de surplus en automne et en hiver est observée au niveau de la station de Guercif, (40%).

**Tableau 54 : Nombre saisonnier d'années déficitaires et excédentaires selon les saisons**

		Automne	Hiver	Printemps	Eté
<b>Nombre d'années déficitaires</b>	<b>Berkine</b>	18	17	19	17
	<b>Belfarah</b>	16	17	19	18
	<b>Guercif</b>	15	15	17	18
<b>Nombre d'années excédentaires</b>	<b>Berkine</b>	7	8	6	8
	<b>Belfarah</b>	9	8	6	7
	<b>Guercif</b>	10	10	8	7

### 3.1.2 Détection des points de changement au sein des séries saisonnières

L'examen des modules saisonniers des débits par les tests de détection des ruptures montre deux signaux de changement de tendance non-significatifs statistiquement en automne et en hiver. Une augmentation des modules saisonniers des débits a été constatée après les points de changement. Bien que les séries hydrologiques traitées soient courtes par rapport à celles des précipitations, la réponse hydrologique auhaussement des cumules pluviométriques est constatée dans les modules automnaux et hivernaux (Tab. 55).

**Tableau 55 : Moyennes des débits calculées avant et après les ruptures au niveau des séries hydrométriques saisonnières (1990/1991-2014-2015)**

		<i>Berkine</i>	<i>Belfarah</i>	<i>Guercif</i>
<b>Automne</b>	<i>Date de ruptures</i>	2009		2008
	<i>Module avant la rupture en m<sup>3</sup>/s</i>	1.78		9.08
	<i>Modules après la rupture en m<sup>3</sup>/s</i>	4.98		21.02
	<i>Le surplus en m<sup>3</sup>/s</i>	3.2		11.94
<b>Hiver</b>	<i>Date de ruptures</i>	2009	2008	2008
	<i>Module avant la rupture en m<sup>3</sup>/s</i>	0.77	6.6	8.3
	<i>Modules après la rupture en m<sup>3</sup>/s</i>	2.44	12.75	20.7
	<i>Le surplus en m<sup>3</sup>/s</i>	1.67	6.15	12.4

### 3.1.3 Tendances des modules saisonniers

Selon les résultats du test classique de Mann Kendall, la tendance générale de l'évolution des modules saisonniers des débits dans le bassin est strictement positive. Les valeurs de Z sont toujours inférieures au seuil de significativité de 5%. Les tendances maximales vers l'augmentation ont été observées en automne et en hiver au niveau de la station de Berkine et de Guercif. La faible pente de « Sen » indique un faible haussement annuel des débits. Cette évolution oscille entre 0.5 m<sup>3</sup>/s en hiver et de 0.025 m<sup>3</sup>/s en été à Guercif (Tab. 56).

**Tableau 56 : Tendances des débits moyens saisonniers selon le test classique de Mann-kendall**

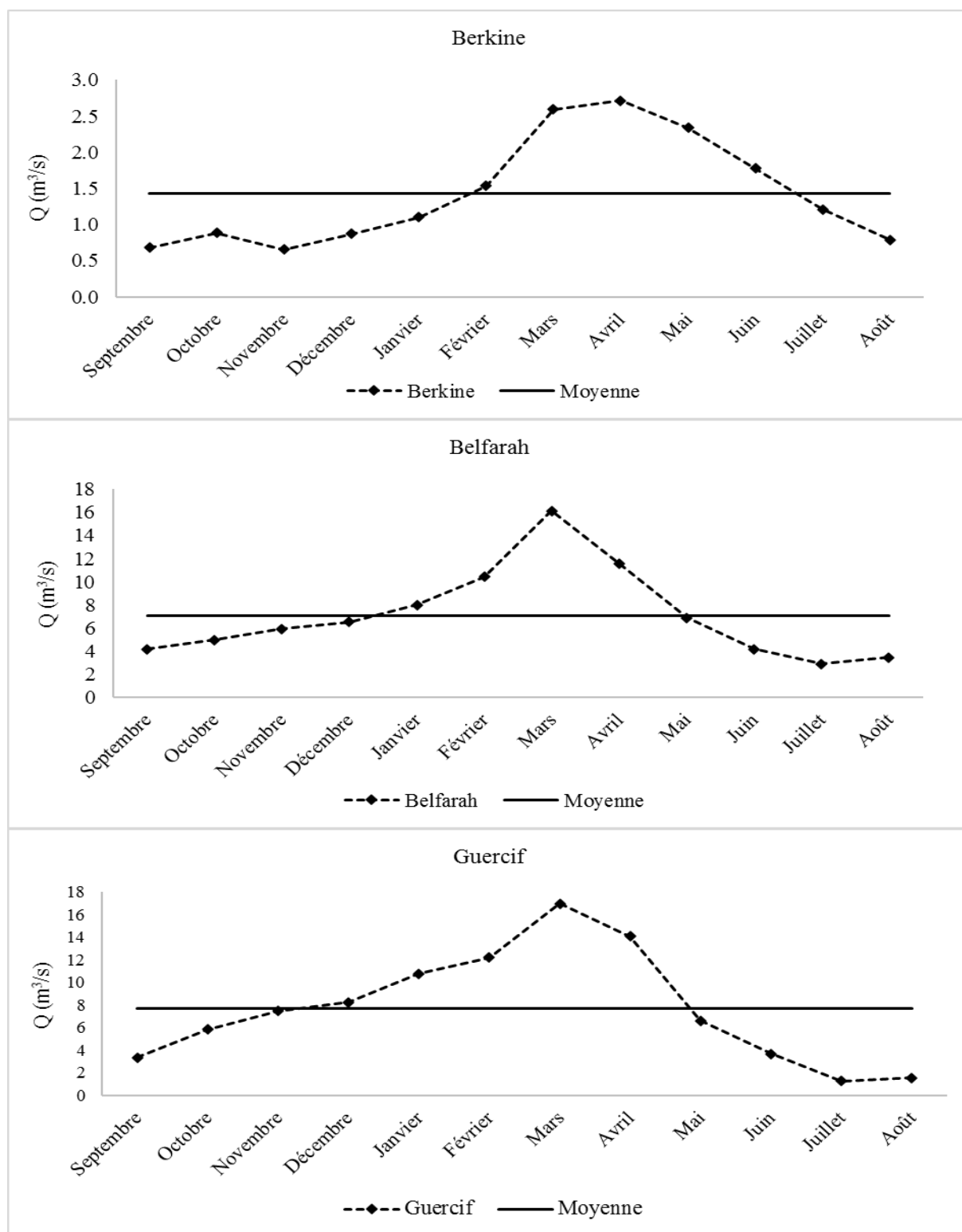
	<b>Automne</b>		<b>Hiver</b>		<b>Printemps</b>		<b>Eté</b>	
	Valeur Z de Mann Kendall	Pente de Sen	Valeur Z de Mann Kendall	Pente de Sen	Valeur Z de Mann Kendall	Pente de Sen	Valeur Z de Mann Kendall	Pente de Sen
<b>Berkine</b>	1.33	0.04	1.68	0.06	0.61	0.01	0.88	0.06
<b>Belfarah</b>	0.93	0.113	0.96	0.15	1	0.1	0.6	0.154
<b>Guercif</b>	1.28	0.14	1.56	0.5	1.1	0.43	0.58	0.025

### 3.2 Régimes mensuels des débits

Le régime d'écoulement de l'Oued Melloulou au cours d'une année moyenne est caractérisé globalement par l'existence de deux périodes différentes : une saison de hautes eaux, qui correspond à une période relativement pluvieuse, de décembre au mois d'avril inclus, pour la partie avale, et de janvier à avril en amont. Une saison de basses eaux plus longue, correspondant à une période sèche qui se prolonge de mai jusqu'au mois de novembre.

Il s'agit d'un régime simple avec un seul maximum en mars pour les stations de Belfarah et Guercif, et en avril pour la station de Berkine. Les modules mensuels de l'Oued Melloulou,

au niveau de l'exutoire, oscillent entre 16.9 m<sup>3</sup>/s calculé en mars et 1.2 m<sup>3</sup>/s en Juillet (Fig. 77).



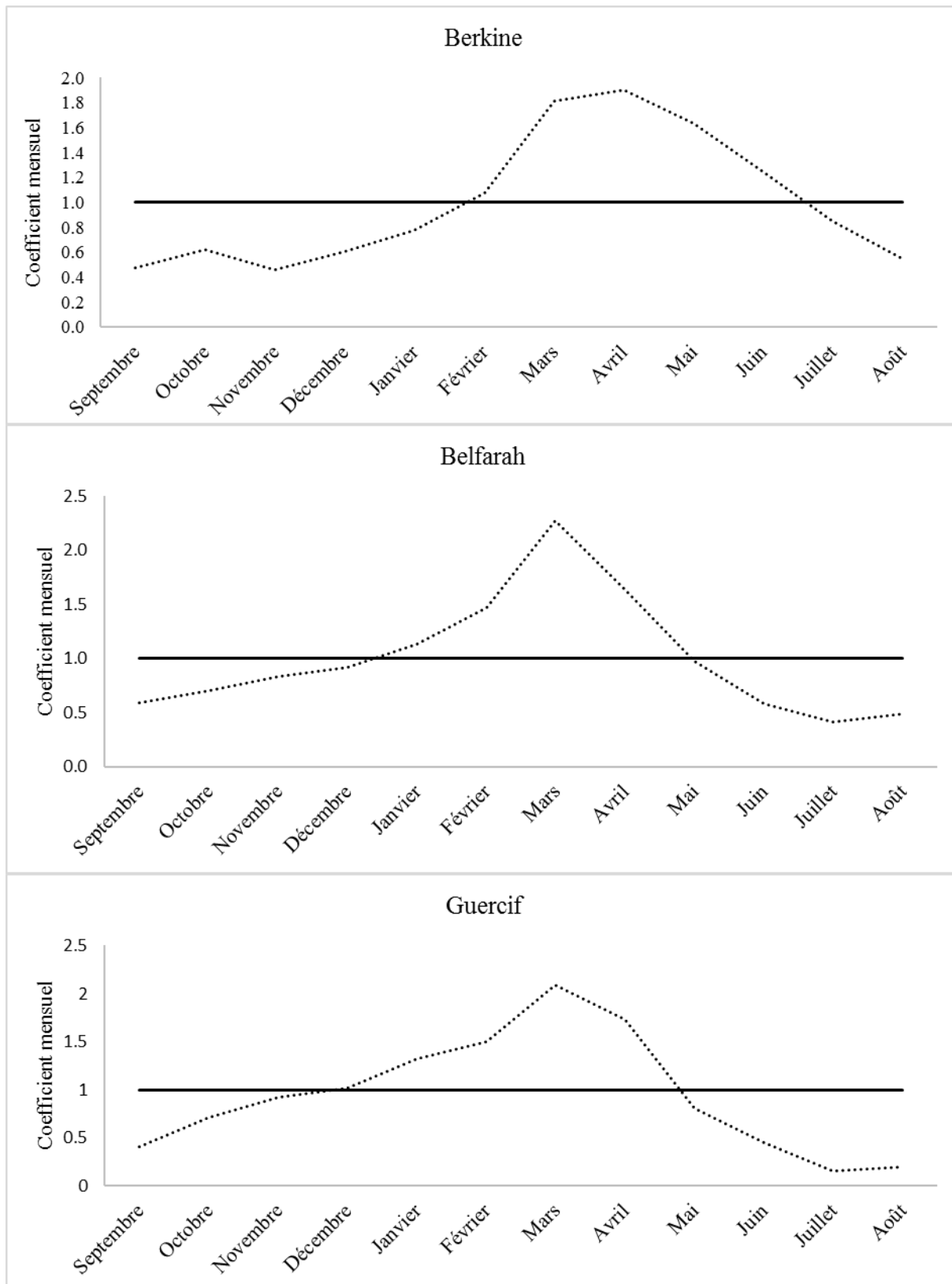
**Figure 77 : Régime mensuel des débits au niveau du BV de l'Oued Melloulou (1990/1991-2014/2015)**

### **3.2.1 Coefficient mensuel des débits**

Le coefficient mensuel du débit ( $C_m$ ) est la relation entre le débit moyen mensuel et le module interannuel de la série hydrologique. Il permet de mettre en évidence la contribution d'un mois dans une année hydrologique. Ce coefficient est utilisé pour mettre en lumière la variabilité des écoulements, qui se manifeste par des périodes de basses et de hautes eaux. Les valeurs de  $C_m > 1$  indiquent une période des hautes eaux alors que  $C_m < 1$  indiquent la période des basses eaux.

Au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, la période des hautes eaux s'étend sur 5 mois : elle est de décembre à avril pour les stations de Belfarah et Guercif, en aval, et de février à juin pour la station de Berkine en amont.

Pendant la période des hautes eaux, le maximum des modules mensuels est enregistré en Mars. Il dépasse  $16 \text{ m}^3/\text{s}$  à Belfarah et à Guercif. Les valeurs minimales des débits pendant la période des basses eaux sont observées en juillet. Elles sont de  $2.9$  et  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  à Belfarah et à Guercif respectivement. Cette situation est un peu différente au niveau de la série de Berkine où la valeur maximale des modules mensuels est de  $2.72 \text{ m}^3/\text{s}$  enregistrée en avril, alors que la valeur minimale est de  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$  en août (Fig. 78).



**Figure 78 : Coefficient mensuel des débits au niveau du BV de l'Oued Melloulou (1990/1991-2014/2015)**

### **3.2.2 Régimes d'écoulement probables**

En comparant les années excédentaires et déficitaires, le régime mensuel moyen ne donne qu'une image partielle du régime réel. D'où l'importance de procéder à une étude fréquentielle des valeurs mensuelles surtout pour un cours d'eau à régime très irrégulier tel que l'Oued Melloulou (Mouhdi, 1993).

L'analyse du régime d'écoulement probable a été réalisée à la base des séries des modules mensuels des débits. Cette étude a été établie aux fréquences de 10% (D1), 25% (Q1), 50% (Q2), 75% (Q3), 90% (D9). Ces dernières fréquences désignent une année très sèche, sèche, normale, humide et très humide respectivement (Fig. 79).

**Au niveau de la station de Berkine :** le régime probable est unimodale avec un maximum en avril, sauf pour les années déficitaires exprimées par le D1 où ce maximum est enregistré en mars. Pour une année extrêmement humide, la valeur maximale probable peut atteindre 6.4 m<sup>3</sup>/s en avril. Alors que pour une année extrêmement sèche, le débit maximal ne dépasse pas 0.6 m<sup>3</sup>/s en mars (Fig. 79).

**Au niveau de la station de Belfarah :** les tracés des débits probables présentent un régime unimodal avec un maximum absolu en mars en années extrêmement humides et humides. Celui-ci se déplace vers février et avril en années normales. Les écarts entre les débits des années déficitaires excédentaires augmentent de janvier à avril. Pour une année extrêmement humide, la valeur maximale probable peut atteindre 42 m<sup>3</sup>/s en mars. Alors qu'elle ne dépasse pas 1 m<sup>3</sup>/s pour une année extrêmement sèche estimée en même mois (Fig. 79).

**Au niveau de la station de Guercif :** en années extrêmement humides, un maximum absolu est situé en mars. Celui-ci se déplace en avril en années humides et il est secondé par des maximum secondaires de novembre à janvier. En années normales, un maximum principal est enregistré en mars avec un autre secondaire en décembre. Les écarts par rapport à la valeur médiane sont très importants vers l'humide que ceux vers le sec. Ce constat caractérise des débits irréguliers avec des crues violentes. La valeur probable la plus élevée est estimée de 61 m<sup>3</sup>/s en mars (Fig 79).

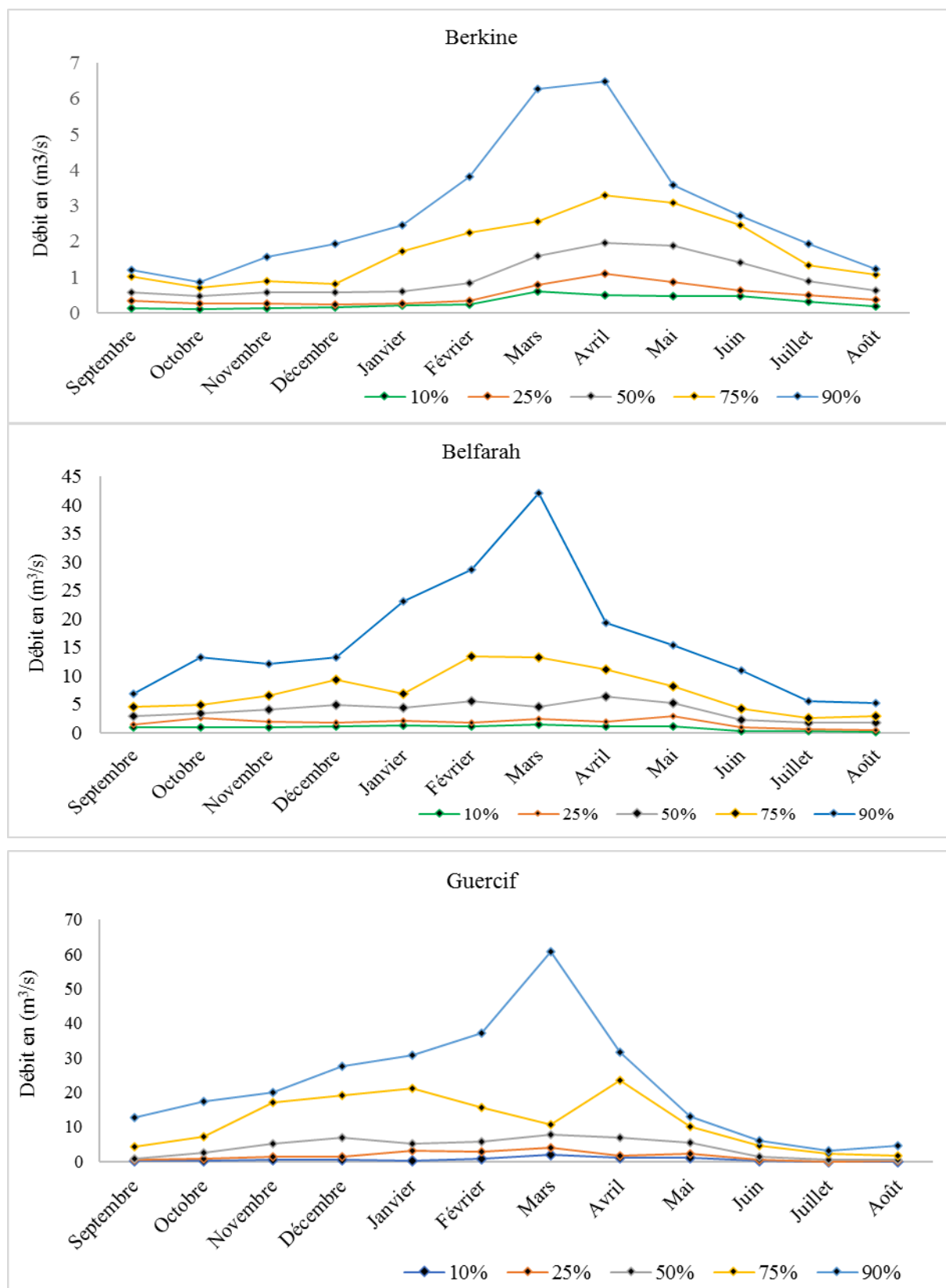


Figure 79 : Régimes mensuels d'écoulement probable au niveau du BV de l'Oued Melloulou (1990/1991-2014/2015)

### 3.2.3 Coefficient de variation

L'étude du coefficient de variation pour les séries des modules mensuelles permet de constater la forte variabilité des débits moyens d'une année à une autre. Il oscille entre 0.67 et 2.2. Cette variation est à peu près généralisée sur tout le bassin versant. Sauf pour les résultats du mois de mai, presque toutes les valeurs sont supérieures à 1 (Tab. 57).

**Tableau 57 : Coefficients de variation calculés pour les modules mensuelles des débits ; 1990/1991-2014-2015**

	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
<b>Berkine</b>	<b>0.67</b>	<b>2.20</b>	<b>0.81</b>	<b>1.33</b>	<b>1.05</b>	<b>1.10</b>	<b>1.21</b>	<b>0.97</b>	<b>0.97</b>	<b>1.18</b>	<b>1.27</b>	<b>0.94</b>
<b>Belfarah</b>	<b>1.19</b>	<b>1.03</b>	<b>1.08</b>	<b>0.90</b>	<b>1.13</b>	<b>1.19</b>	<b>1.38</b>	<b>1.16</b>	<b>0.96</b>	<b>1.30</b>	<b>1.59</b>	<b>1.57</b>
<b>Guercif</b>	<b>1.49</b>	<b>1.62</b>	<b>1.14</b>	<b>1.11</b>	<b>1.22</b>	<b>1.14</b>	<b>1.37</b>	<b>1.03</b>	<b>0.86</b>	<b>1.63</b>	<b>1.65</b>	<b>1.73</b>

### 3.2.4 Détection des ruptures

La vérification de la cohérence des données hydrologiques mensuelles montre les points de changement suivants :

**Au niveau de la station de Berkine :** En 2007 pour la série des mois de septembre, en 2008 pour les séries de novembre, décembre et mars, en 2009 au sein des séries de Janvier et février (Tab. 58).

**Au niveau de la station de Belfarah :** une seule rupture a été détectée en 2008 au niveau des séries de janvier et février (Tab. 58).

**Au niveau de la station de Guercif :** un point de changement a été observé : en 2007 au niveau de la série de septembre et en 2008 au niveau des séries de janvier, février et mars. Les ruptures détectées sont considérées comme statistiquement non significatives (Tab. 58).

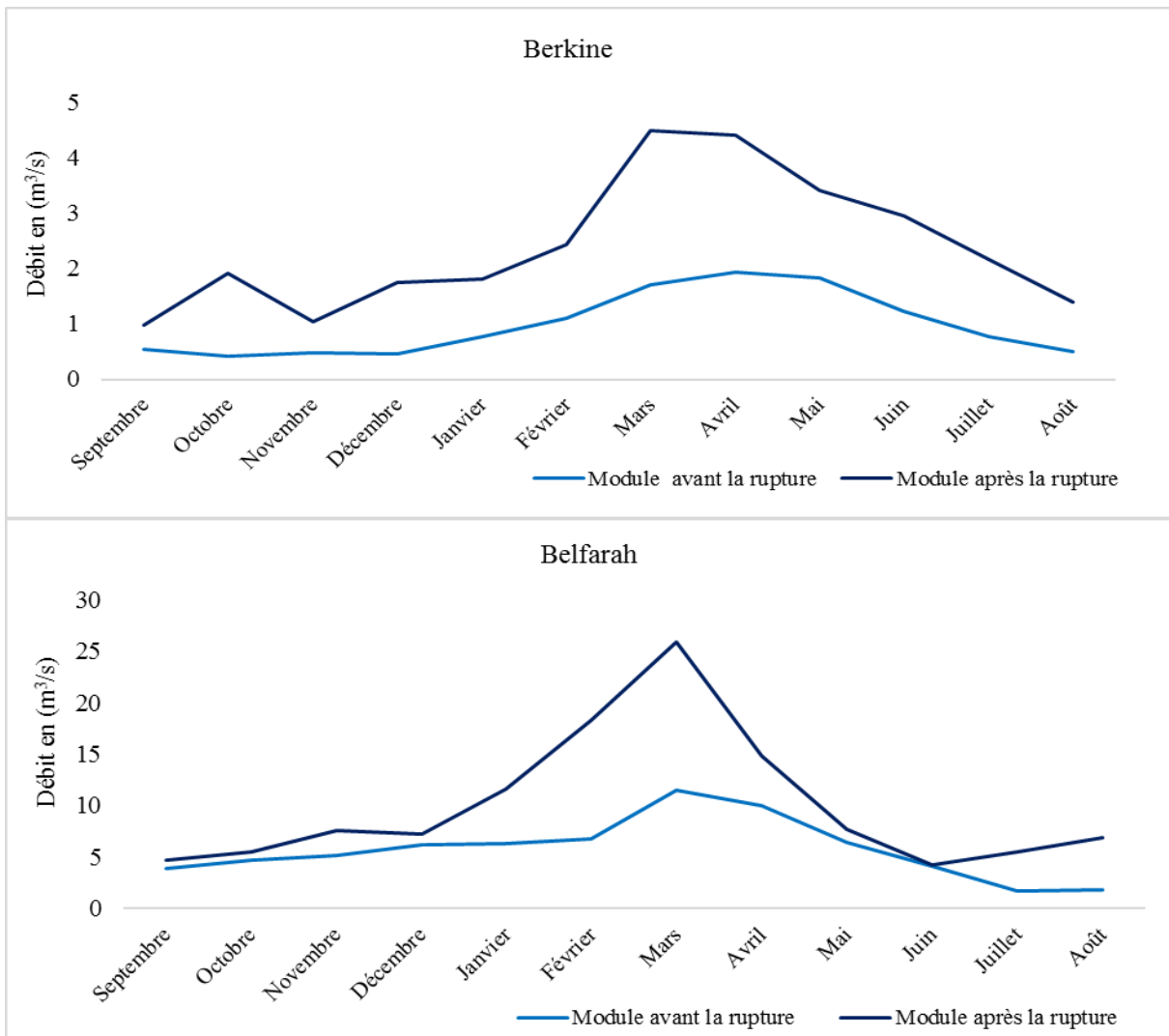
**Tableau 58 : Ruptures détectées au niveau des séries de données hydrométriques mensuelles**

	Date de rupture		
	Berkine	Belfarah	Guercif
<b>Septembre</b>	2007		2007
<b>Octobre</b>			
<b>Novembre</b>	2008		
<b>Décembre</b>	2008		
<b>Janvier</b>	2009	2008	2008
<b>Février</b>	2009	2008	2008
<b>Mars</b>	2008		2008

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Après ces ruptures, une augmentation des valeurs des modules mensuels a été remarquée dans toutes les séries. Les importants écarts entre les modules mensuels d'après et d'avant la rupture sont observés au niveau des séries des mois de Janvier, février et mars. La projection de ces points de changement sur l'ensemble des séries de données hydrologiques montre des résultats similaires, avec des écarts plus ou moins faibles en été et en automne (Fig. 80).

L'évolution des terres agricoles irriguées par les apports de l'Oued engendrant le prélèvement de grandes quantités d'eau d'une part et la demande climatique élevée en vapeur d'eau d'autre part peuvent être des causes principales de faibles valeurs de débits enregistrés en aval pendant l'été et l'automne.



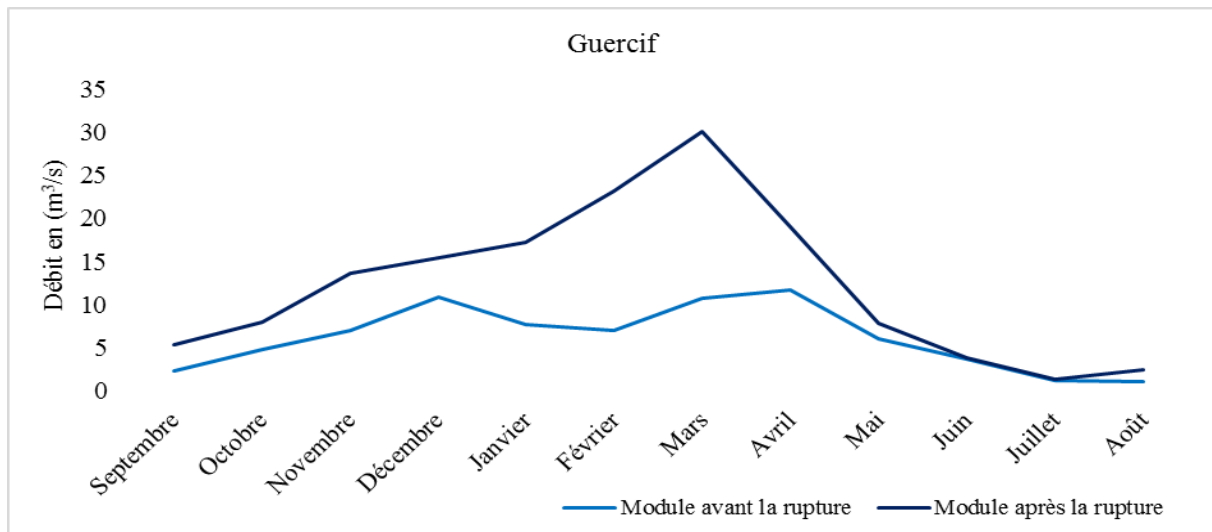


Figure 80 : Modules mensuels d'écoulement avant et après les ruptures (1990/1991-2014/2015)

### 3.2.5 Test des tendances

Afin de tester les tendances de l'écoulement mensuel dans le bassin versant de l'Oued Melloulou, le test classique de Mann Kendall a été appliqué pour les séries des modules mensuels des débits, au niveau de la station de jaugeage de Guercif, à l'exutoire, et de Berkine, en amont.

Les résultats obtenus (Tab. 59) montrent une tendance positive généralisée au niveau des séries de Berkine et de Guercif. Les valeurs Z de Mann Kendall les plus élevées ont été observées de novembre à mars à Guercif, et d'octobre à février au niveau des séries de la station de Berkine. Tandis qu'au niveau de la station de Belfarah, des tendances vers la diminution ont été constaté, avec une forte diminution en mars et avril. Il convient de noter que toutes ces tendances sont au-dessous du seuil de significativité de  $\alpha = 0.05$ .

**Tableau 59 : Tendances des séries de données hydrométriques mensuelles au niveau des stations de Guercif et de Berkine**

	Guercif		Berkine		Belfarah
	Valeur de Z	Pente de Sen	Valeur de Z	Pente de Sen	Valeur de Z
<b>Septembre</b>	0.72	0.04	0.56	0.01	-0.44
<b>Octobre</b>	0.07	0.00	1.85	0.02	-0.35
<b>Novembre</b>	1.82	0.24	1.24	0.02	0.54
<b>Décembre</b>	1.66	0.25	1.43	0.03	-0.40
<b>Janvier</b>	1.33	0.19	1.73	0.02	-0.58
<b>Février</b>	1.73	0.47	1.52	0.03	0.12
<b>Mars</b>	1.14	0.41	0.86	0.06	-1.42
<b>Avril</b>	0.91	0.36	0.58	0.06	-1.38
<b>Mai</b>	0.54	0.11	0.21	0.03	-0.63
<b>Juin</b>	0.65	0.03	0.84	0.03	-0.09
<b>Juillet</b>	0.63	0.01	1.24	0.04	-0.77
<b>Août</b>	0.56	0.01	0.91	0.03	-0.09

## 4 Phases hydrologiques

### 4.1 Analyse des débits de crues

La récurrence d'anomalies extrêmes des précipitations, entraînant des crues, est une composante normale de la variabilité naturelle du climat (Amoussou, 2015). Les crues qui engendrent des inondations donnent une image dramatique d'une situation exceptionnelle parfois catastrophique tant pour les chercheurs et les gestionnaires que pour la population (El Ghachi, 2007). Ce phénomène représente la calamité naturelle la plus répandue et à la fois les plus fréquente à la surface du globe. Ainsi, les inondations sont les catastrophes qui touchent le plus grand nombre d'individus (Obda, 2004 et Lasri, 2015). Elles ont par conséquent des effets néfastes et de fortes incidences socio-économiques et écologiques (Obda, 1991 et 2004).

Au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, la majorité des terres agricoles irriguées se situent sur les terrasses fluviales, en contact directe avec les plaines alluviales des cours d'eau. La vulnérabilité de ces terres agricoles est, par conséquent, élevée face aux événements hydrologiques extrêmes. Ainsi, la situation géographique de notre bassin versant dans un milieu aride, avec des précipitations orageuses et de forte intensité, augmente la fréquence des crues violentes. La compréhension et la prévention du phénomène des extrêmes hydrologiques des hautes eaux a, donc, une importance majeure.

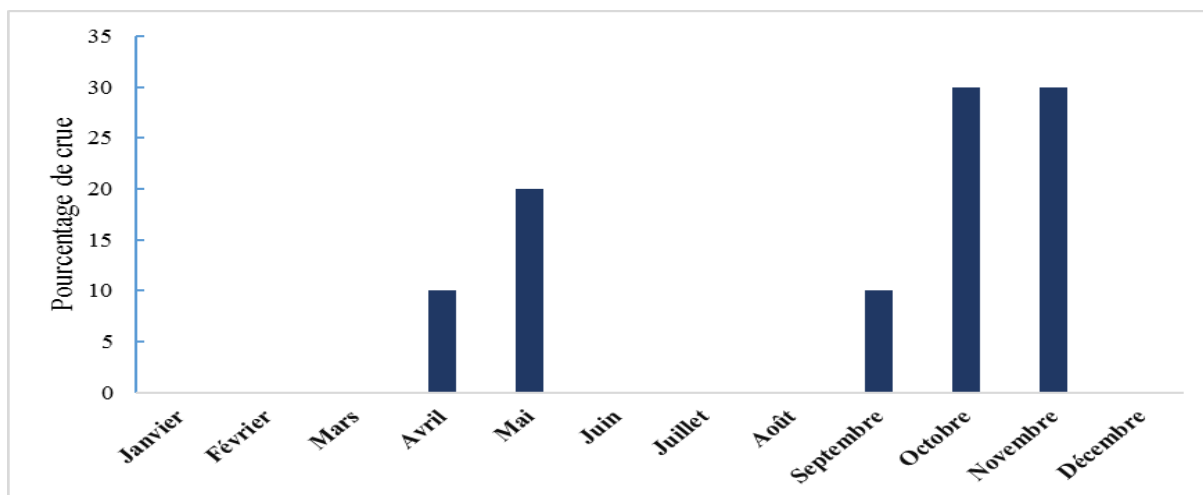
Les données hydrologiques utilisées dans cet axe sont provenues des archives de l'Agence du Bassin Hydraulique de la Moulouya (ABHM).

#### **4.1.1 Genèse des crues.**

Les crues sont dues à une convergence de plusieurs facteurs physiques responsables du ruissellement superficiel tels que : la quantité et la répartition spatiotemporelle des pluies dans le bassin versant, la saturation du sol par les premières pluies, la morphométrie, la topographie, la forme du bassin...

Le facteur anthropique constitue un élément aggravant dans l'augmentation des débits de crue. En effet, les activités urbanistiques, agricoles et les aménagements hasardeux sur les berges des cours d'eau accélèrent la crue. Il faut noter qu'une crue n'entraîne pas systématiquement un phénomène d'inondation.

Sur une période de 40 ans (1970, 2010), les crues de Melloulou se concentrent en automne, 70%, et au printemps, 30%, avec une prédilection marquée pour les mois d'octobre et de novembre (Fig. 81).



**Figure 81 : Evènements des débits de crue au niveau du BV de Melloulou (1990/1991-2014/2015)**

#### **4.1.2 Analyse statistique des débits moyens journaliers maximums (débits de crues).**

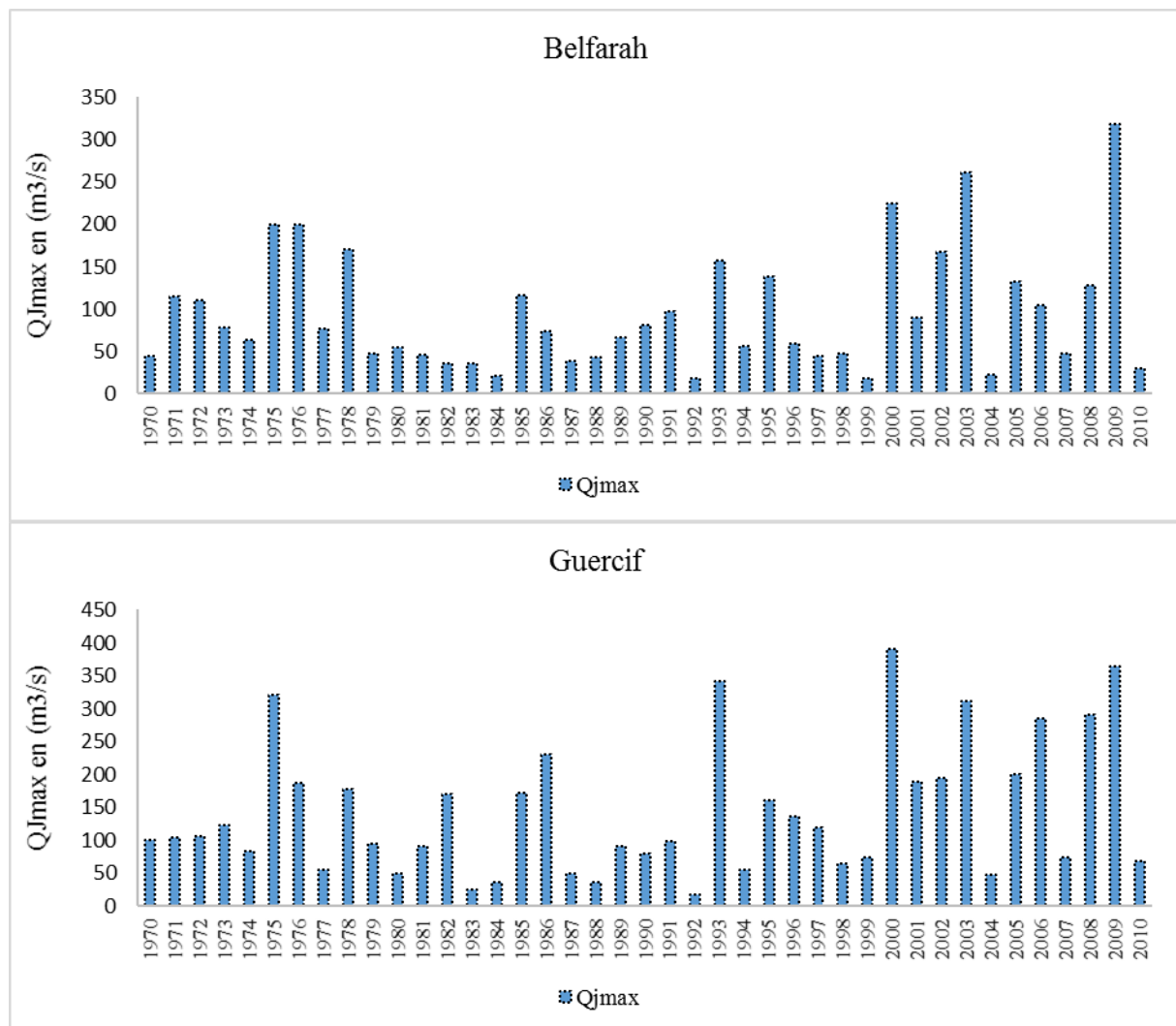
Les débits moyens journaliers maximums (QJmax) apportent une connaissance assez importante sur les débits de crue produits par les bassins versants (Qadem, 2015). Ils constituent le paramètre hydrologique le plus utilisé pour l'analyse des écoulements de crue. Pour cela, l'analyse des débits de crue dans le bassin versant de l'Oued Melloulou est élaborée à base des QJmax enregistrés au niveau des stations de Belfarah et de Guercif, sur une période suffisamment longue entre 1970 et 2010 (Tab. 60). La série des enregistrements

des débits journaliers que nous disposons au niveau de la station de Berkine est très courte. C'est pourquoi, nous avons donc décidé de ne pas l'utiliser dans cet axe.

**Tableau 60 : Variabilité temporelle des QJmax enregistrés à Belfarah et à Guercif**

	Période	Moyenne	Max	Min	Ecartype	CV
Belfarah	1970 - 2010	92.2	319.0	17.6	72.2	127.7
Guercif	1971 - 2010	143.3	391.0	17.0	101.2	141.5

Le tableau 60 présente des forts écarts entre les valeurs maximales et minimales des QJmax. Ainsi, le débit moyen journalier le plus élevé à Guercif est de 391 m<sup>3</sup>/s observé en 2000, alors que le faible débit observé dans cette série est de 17 m<sup>3</sup>/s enregistré en 1992. La même allure a été constatée à Belfarah. Cette dispersion exprimée par les valeurs élevées de l'écartype au niveau des deux stations. Les valeurs élevées du coefficient de variation montrent ainsi une forte irrégularité interannuelle des débits journaliers maximums (Tab. 59).



**Figure 82 : Evolution temporelle des QJmax enregistrés à Belfarah et à Guercif**

#### **4.1.3 Tendances et ruptures des séries des QJmax**

Selon les résultats du test de Mann-Kendall, les deux séries de données présentent une tendance générale vers l'augmentation. La valeur de Z, estimée via ce test, montre que la tendance est statistiquement significative, au seuil de  $\alpha = 0.05$ , au niveau de la série de Guercif seulement (Tab. 61). Ainsi, une rupture significative, au seuil de 99% à Guercif et de 95% à Belfarah, en 1999 a été détectée. Elle est suivie par une augmentation de la moyenne des débits de 104.7 m<sup>3</sup>/s à Guercif et de 61.3 m<sup>3</sup>/s entre avant et après la rupture (Fig. 83). Cet aspect a été visualisé sur les figures de la présentation graphique du test de Buishand appliqué sur les QJmax enregistrés dans les deux stations (Fig. 83).

**Tableau 61 : Tendances des QJmax enregistrés à Belfarah et à Guercif ; 1970/2010**

	<i>Période d'observation</i>	<i>Z</i>	<i>Pente de Sen</i>
<b>Guercif</b>	1970 - 2010	2.73	8
<b>Belfarah</b>	1971 - 2010	1.22	1.6

#### **4.1.4 Coefficient de puissance de crue de (Pardé, 1949)**

La crue indique la réponse d'un bassin versant pendant un pas de temps court à une averse ou à une séquence pluvieuse donnée. L'importance des crues peut être quantifiée par plusieurs critères : son volume d'eau écoulé, son débit maximal absolu et spécifique et son coefficient de puissance "Cp" (cité par Sirtou, 1995). Ce coefficient est déterminé selon la formule suivante :

$$Cp = \frac{Q}{\sqrt{A}}$$

Avec **Q** : est le débit moyen journalier et **A** : la surface totale du bassin versant contrôler

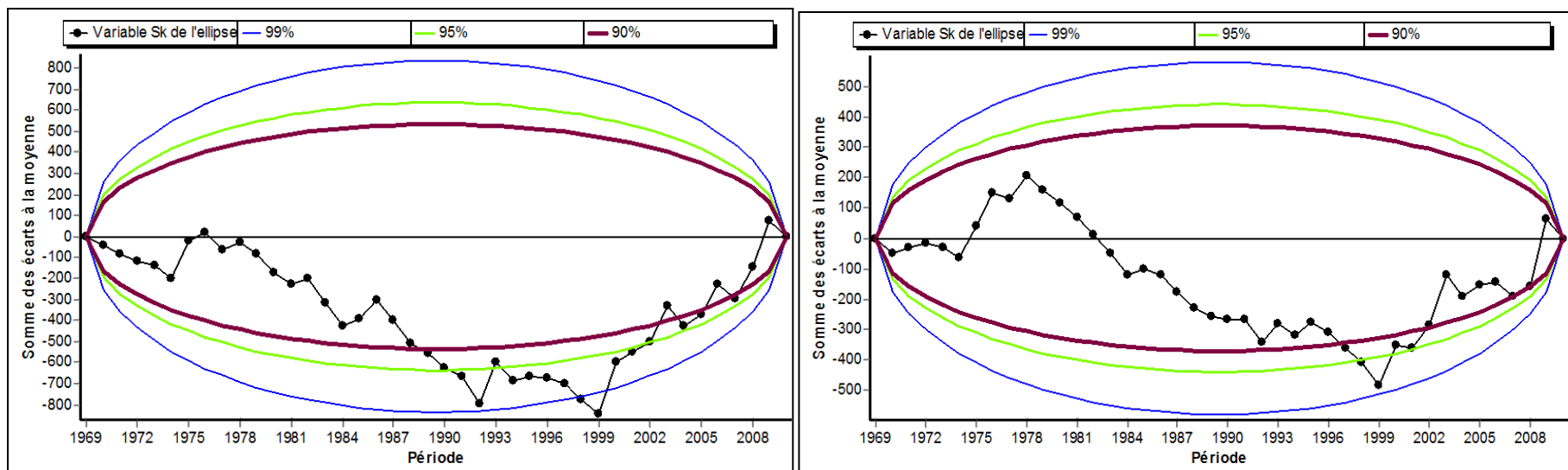


Figure 83 : Présentation graphique du test de Buishand appliqué aux débits moyens journaliers maximaux (Qmax) enregistrés à Belfarah (à droite) et à Guercif (à gauche) ; 1970/2010

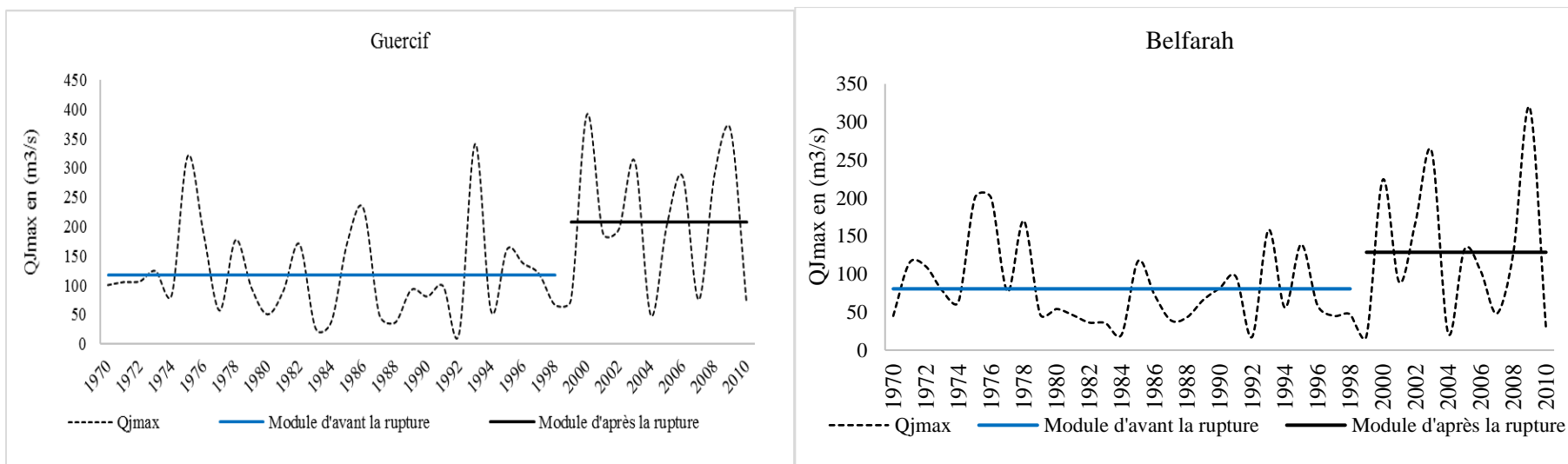
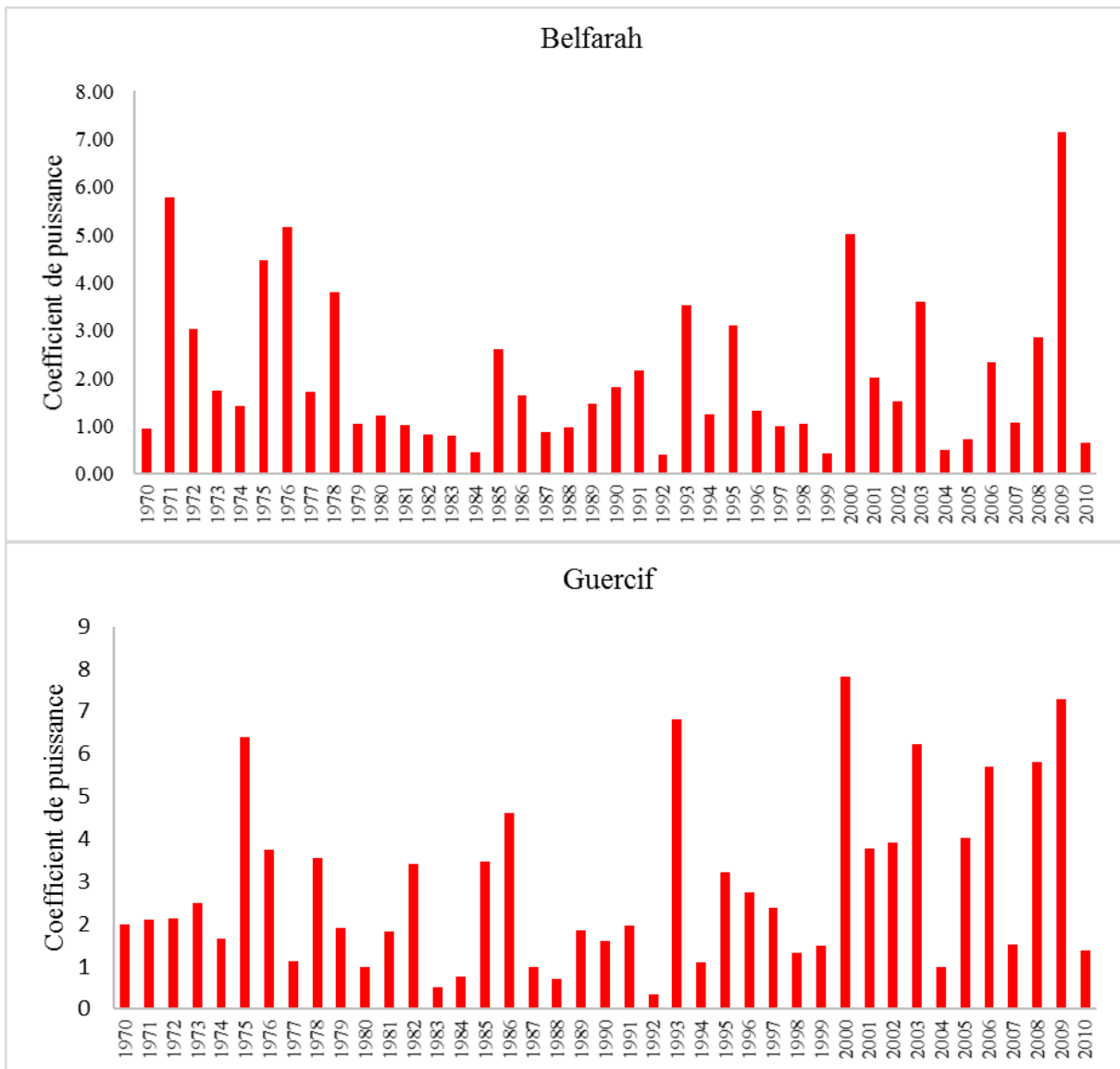


Figure 84 : Moyens des débits moyens journaliers maximaux (Qmax) enregistrés à Belfarah et à Guercif avant et après les ruptures ; 1970/2010



**Figure 85 : Coefficient de Pardé appliqué aux QJmax enregistrés à Belfarah et à Guercif (1970/2010)**

Les valeurs utilisées dans le calcul du coefficient de puissance de **Pardé** sont des moyennes journalières, ils ne présentent pas alors strictement les valeurs des débits de pointe. Cependant, elles fournissent des résultats importants sur le caractère violent des crues au niveau du bassin versant de l’oued Melloulou, puisque la majorité des valeurs calculées de Cp dépassent la moyenne (Fig. 85).

#### 4.1.5 Ajustement des QJmax aux lois de probabilité

L’analyse fréquentiel des débits moyens journaliers maximums d’un bassin versant est une étape primordiale pour une bonne compréhension des apports produits par ce dernier (Qadem, 2015). Cette analyse permet d’apprécier la grandeur probablement à atteindre par le débit d’un cours d’eau lors d’une crue. Cela est d’une grande utilité pour de multiples

applications telle que la construction d'ouvrages hydrauliques et la protection des riverains (Mouhdi, 1993).

Les données des QJmax utilisées sont ceux de la station de Guercif et de Belfarah où on dispose d'un échantillon de 41 valeurs, sur la période de 1970 – 2010. Plusieurs lois ont été testées à base du test de  $Khi^2$ , ce test est utile pour chercher le meilleur lien entre 2 variables ou plus. L'ajustement des QJmax à la loi « *racine Gumbel* » donne le bon coefficient de détermination (Fig. 86).

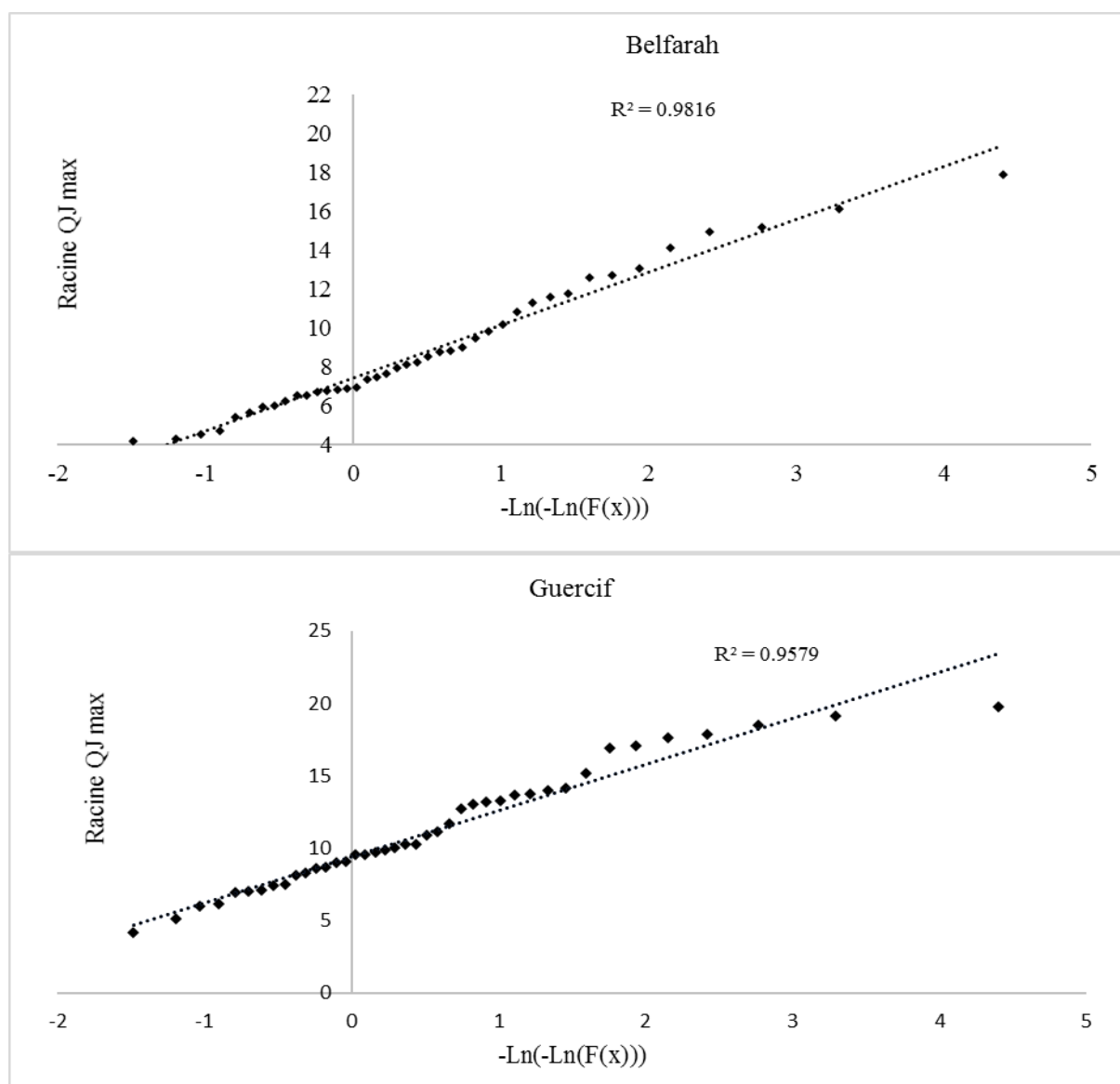


Figure 86 : Ajustement des débits moyens journaliers maximaux (QJmax) à la loi racine Gumbel ; 1970/2010

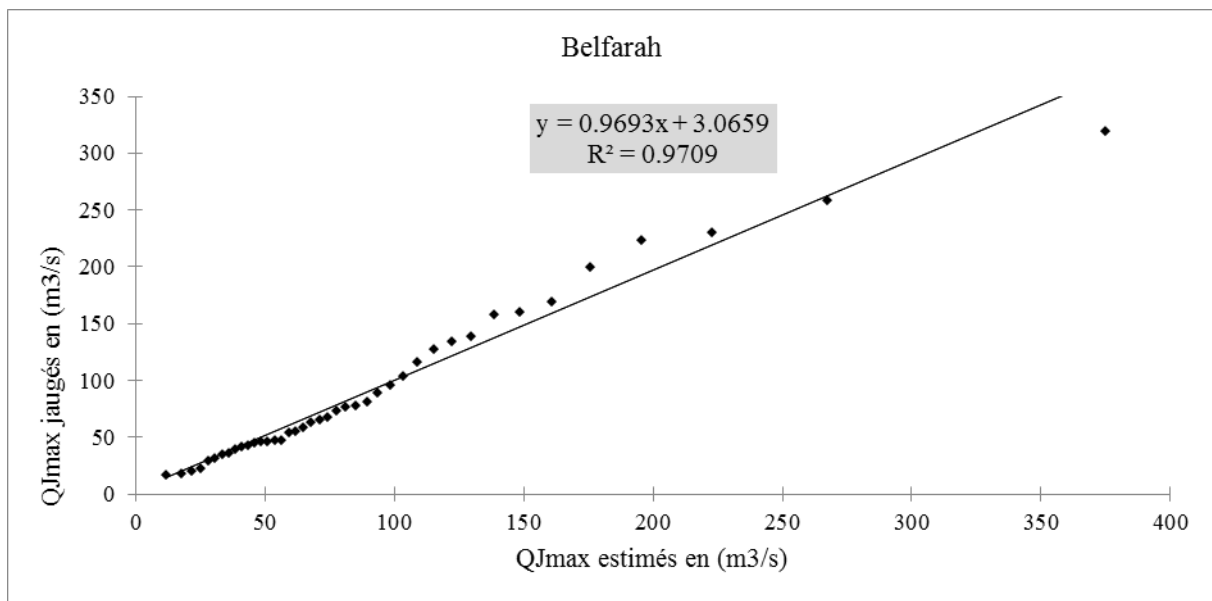
**Tableau 62 : QJmax estimés pour différents temps de retour**

Temps de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Q estimé à Belfarah	25.39	161.17	203.19	243.5	295.68	334.78
Q estimé à Guercif	111.78	201.63	275.6	357.38	479.01	581.8

Les résultats de l'ajustement à la loi *racine-Gumbel* montrent que les crues sont assez significatives dans ce milieu d'étude. Pour un temps de retour T= 100 ans, les valeurs des débits estimés sont respectivement de 335 et de 582 m<sup>3</sup>/s à Belfarah et à Guercif. Ces valeurs correspondent à 47 fois le module annuel de la série de Belfarah et 72 fois de la série de Guercif (Tab. 62). Ces résultats abordent une puissance importante des crues dans le bassin versant.

#### 4.1.6 Débits estimés/ débits jaugé

La corrélation entre la variable réduite U de la loi utilisée (Racine Gumbel) et les QJmax jaugés est très forte, elle est très proche de 1. Cela nous permet d'avoir des résultats d'estimation fiables des débits moyens journaliers annuels (Fig. 87).



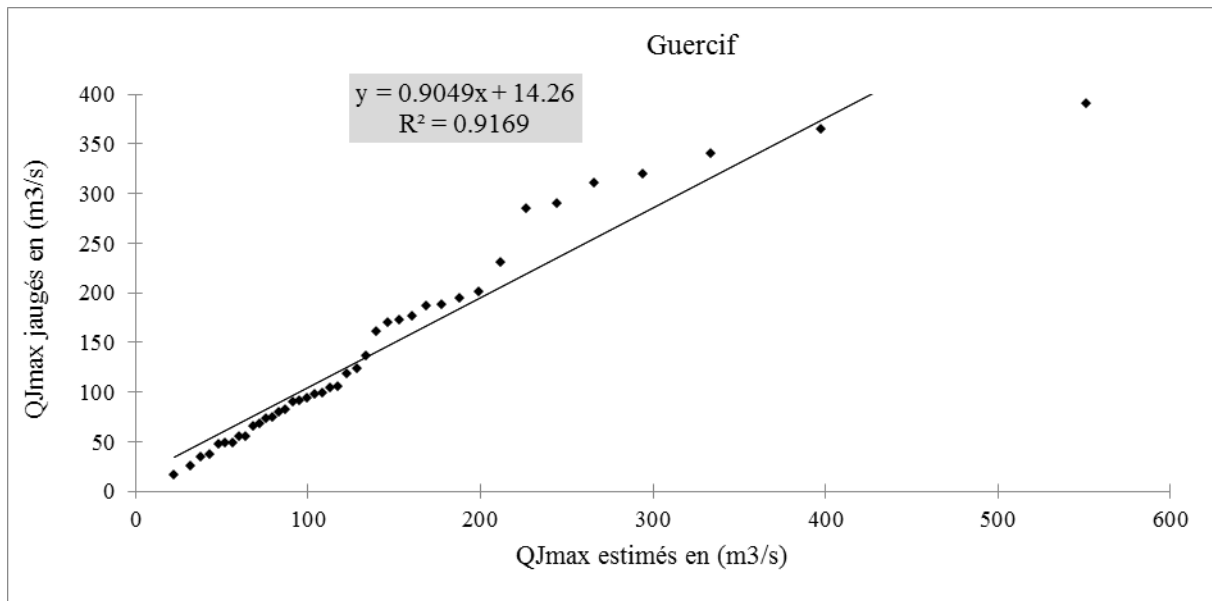


Figure 87 : Corrélations entre les QJmax estimés et ceux jaugés au niveau des stations de Belfarah et de Guercif

#### 4.1.7 Analyse des séries des débits instantanés maximaux

Comme on a précédé, les résultats issus de l'analyse des séries des QJmax montrent une puissance remarquable des crues au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou. Cependant, ces résultats seront clairs plus au niveau des séries instantanées maximales des débits.

Les résultats issus de l'application des tests de détection de ruptures sur les séries des débits instantanés affichent un point de changement de tendance en 1992. Cette rupture est significative au seuil de 90% au niveau de la station de Belfarah et au seuil de 99% à Guercif. Ainsi, il semble qu'il y a une tendance vers la diminution des valeurs hydrologiques extrêmes depuis le début des années 1970 jusqu'à 1992. Après cette date, la tendance est vers le haussement jusqu'à la fin de la série analysée (Fig. 88 et 89)

Ainsi, une augmentation des moyennes des débits instantanés après la rupture a été constatée. En effet, les moyennes des débits instantanés avant la rupture sont de 171 et 241.5 m<sup>3</sup>/s, calculées respectivement au niveau de la station de Belfarah et de Guercif. En revanche, après la rupture elles sont de 257 et 512 m<sup>3</sup>/s (Fig. 90 et 91). Les écarts entre les moyennes d'avant et après la rupture sont très importants et dépassent 250 m<sup>3</sup>/s pour la série de Guercif.

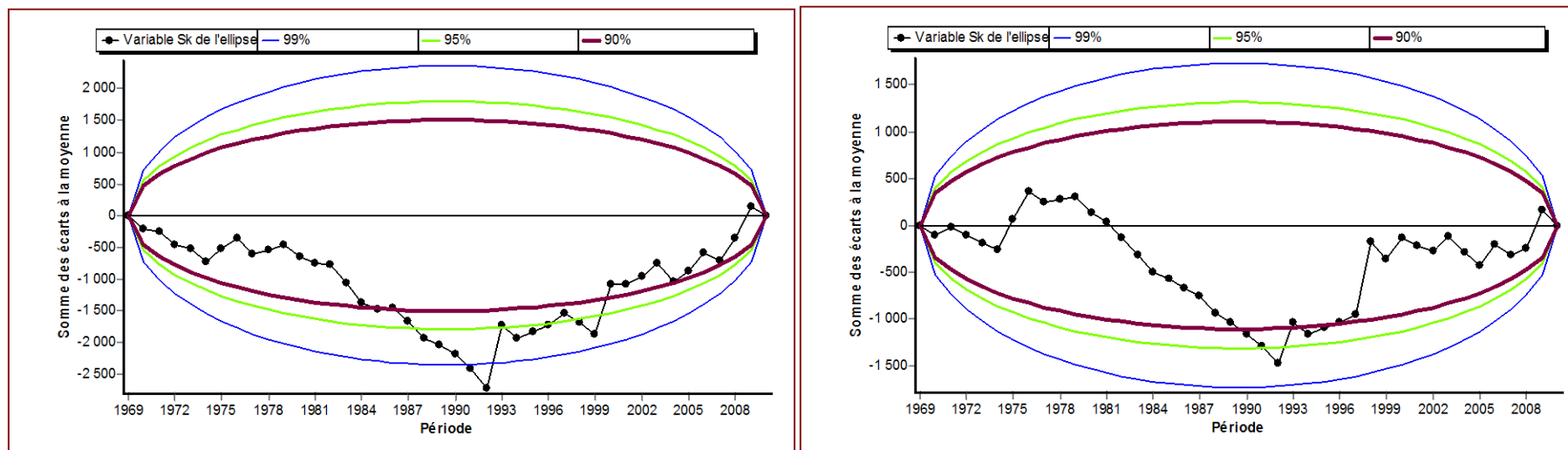


Figure 88 et 89 : Représentation graphique du test de Buishand appliqué aux données des débits instantanés à la station de Guercif et de Belfarah

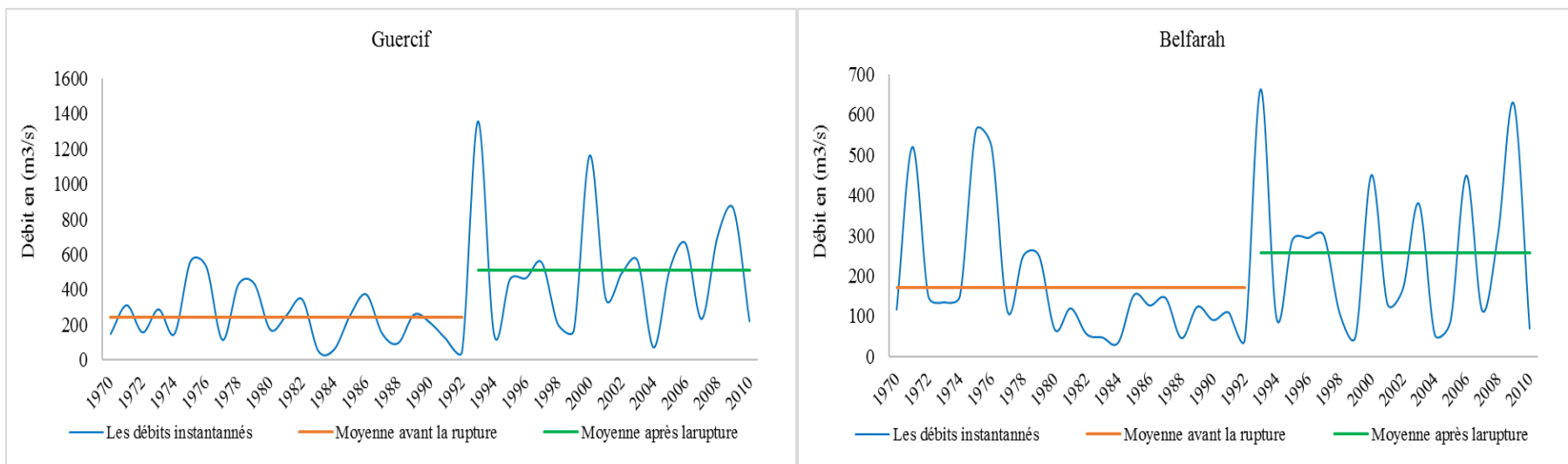


Figure 90 et 91 : Moyennes des débits instantanés d'avant et d'après la rupture, calculées au niveau de la station de Guercif et de Belfarah

#### 4.1.7.1 Tendence des débits instantanés maximaux

Les graphiques des variables  $u(t)$  affichent une tendance vers la diminution commencée en 1976. Cette tendance est devenue significative entre 1984 et 1993 au niveau de la série de Belfarah. Alors que le tracé  $U(t)$  des données de la station de Guercif reste entre les deux limites du test séquentiel de Mann-Kendall. En 1993/1994, les deux courbes ont changé leurs tendances et se sont dirigés vers l'augmentation. La courbe  $U(t)$  a dépassé la limite supérieure en 2005 pour la série de Guercif, comme le montre la figure 92, ce qui indique que la tendance est devenue significative depuis cette date.

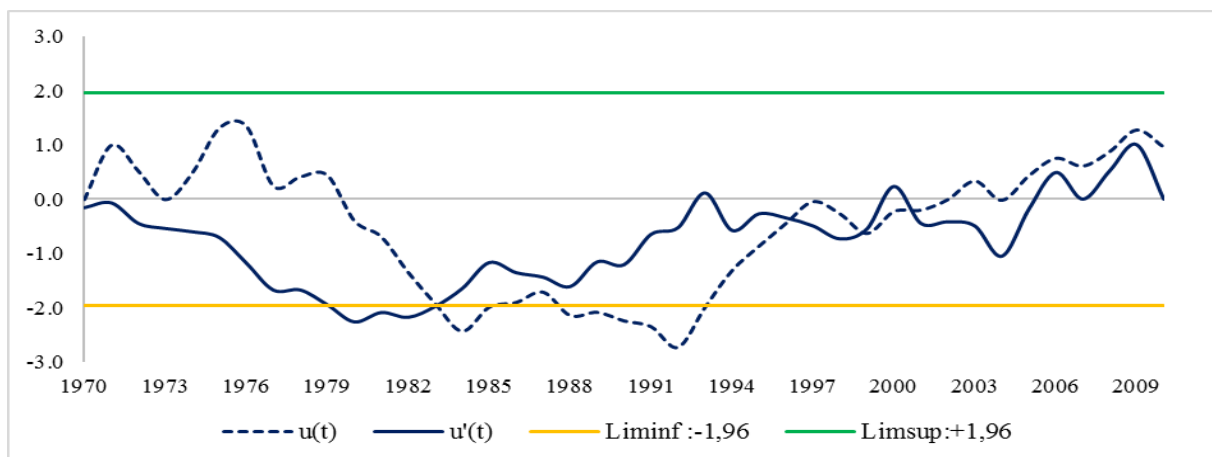


Figure 92 : Tracées du test séquentiel de Mann Kendall appliqué aux données des débits instantanés à la station de Belfarah

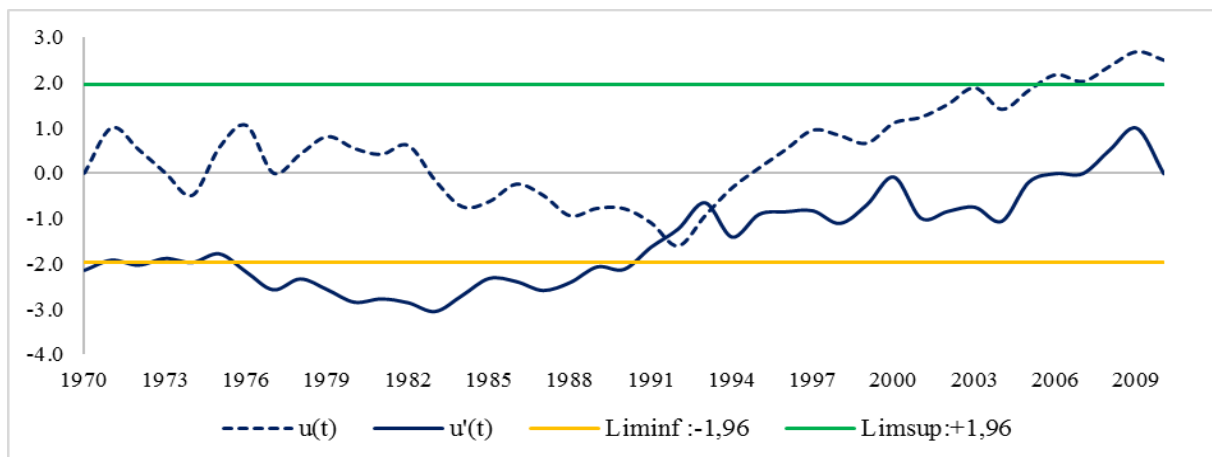


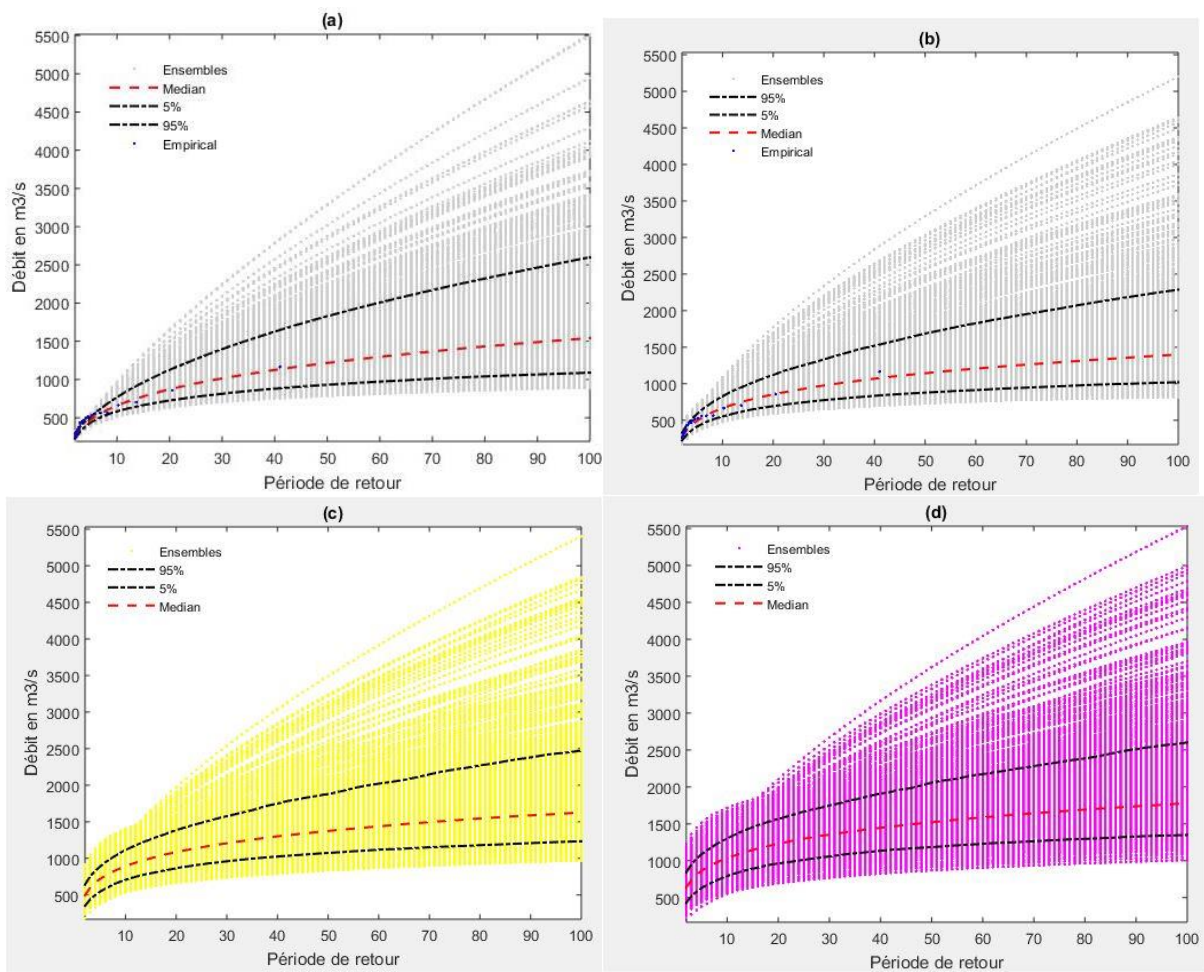
Figure 93 : Tracées du test séquentiel de Mann Kendall appliqué aux données des débits instantanés à la station de Guercif

#### 4.1.7.2 Résultats obtenus

Les résultats obtenus du test classique de Mann Kendall montrent que la série des débits instantanés maximaux de Guercif est considérée non-stationnaire. Elle présente une tendance significative vers l'augmentation avec une valeur  $Z = 1.98$ . Dans ce cas, comme

## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

mentionné dans la méthodologie, le logiciel NEVA génère un ensemble d'estimations des niveaux de débits basé sur un échantillonnage DE-MC. Ces estimations, par le modèle GEV, sont en fonction de la période de retour sous l'hypothèse de stationnarité (a), non stationnaire pendant la période d'observation de 1970 à 2010 (b), non stationnaire basé sur la médiane des paramètres échantillonnés (c), non stationnaire basé sur 95% des paramètres échantillonnés ou à faible risque (Low Risk) (d) et des niveaux de retour effectifs (e) (Fig. 94).



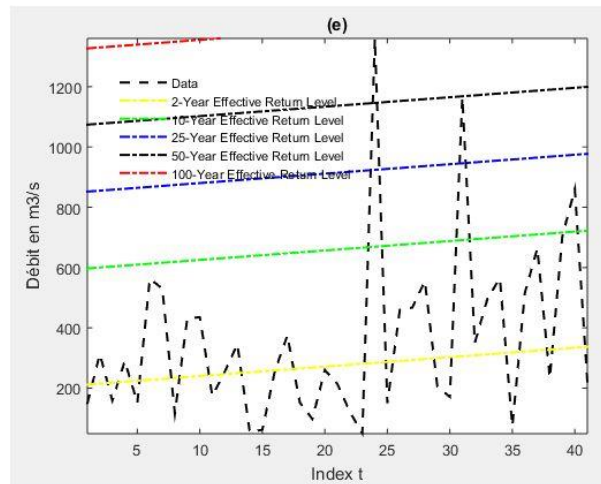


Figure 94 : Niveaux de retour des débits instantanés maximaux selon la période de retour à Guercif sous l'hypothèse de stationnarité (a), de non stationnarité de la période 1970 – 2010 (b), de non stationnarité à base des médianes (c), de non stationnarité basée sur le 95<sup>ème</sup> percentile des paramètres du modèle ou LR (Lower Risk ) (d) et des niveaux de retour effectifs (e).

Pour le cas de la station de Belfarah, le test affiche que cette série n'a aucune tendance significative, alors le logiciel génère une seule estimation sous l'hypothèse de stationnarité (Fig. 95).

Les résultats de l'estimation des débits de retour au niveau de la station de Guercif affichent une variation des valeurs selon l'hypothèse choisie.

En effet, les débits estimés sous l'hypothèse non stationnaire sont faibles à ceux obtenus sous l'hypothèse stationnaire, ce qui est identique avec les résultats de (Cheng et al; 2014) et (Hanchane et al, 2019).

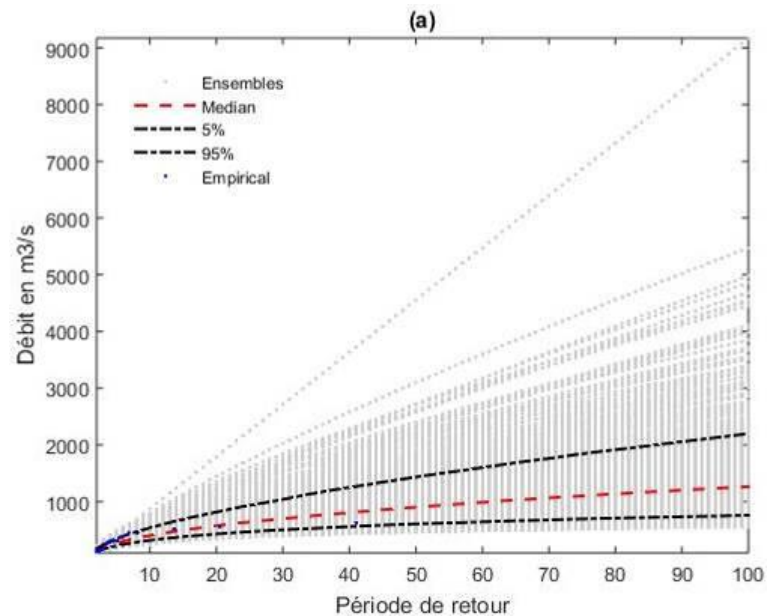


Figure 95 : Niveaux de retour des débits instantanés maximaux selon la période de retour à Belfarah sous l'hypothèse de stationnarité (a) (1970-2010).

Cependant, les résultats obtenus sous l'hypothèse non stationnaire basée sur la médiane des paramètres échantillonnés et sous l'hypothèse non stationnaire basée sur 95% des

paramètres échantillonnés, à faible risque (Low Risk) sont élevés par rapport aux autres (Tab. 63).

**Tableau 63 : Débits de retour probables estimés (m<sup>3</sup>/s) selon les différentes hypothèses au niveau des deux stations hydrométriques choisies.**

Station	Temps de retour en (Année)	10	20	50	70	100
	L'hypothèse					
Station de Guercif	Stationnaire	690	850	1230	1360	1580
	Non stationnaire	660	820	1170	1260	1420
	Non stationnaire basé sur la médiane des paramètres échantillonnés	800	1050	1390	1500	1690
	Non stationnaire basé sur 95% des paramètres échantillonnés, à faible risque (Low Risk)	1030	1230	1500	1680	1830
Station de Belfarah	Stationnaire	280	500	900	1060	1260

Dans un contexte aride, comme celui de Melloulou, caractérisé par une extension des terres agricoles sur les basses terrasses fluviales, les valeurs estimées des débits peuvent engendrer des crues dévastatrices, ce qui cause des pertes en matière de produits et des terres agricoles par le sapement des berges, comme le montrent les cartes ci-dessus. Ainsi, ces valeurs extrêmes estimées peuvent mettre en danger la durabilité des aménagements urbains au niveau de la ville de Guercif, en augmentant le risque des inondations urbaines suite aux débordements potentiels de l'Oued Melloulou.

#### **4.1.8 Temps de concentration**

Le temps de concentration se définit comme le temps nécessaire à une particule de pluie pour se déplacer du point le plus éloigné du bassin versant jusqu'à l'exutoire de celui-ci (Roche, 1963). L'estimation de ce paramètre est possible en mesurant la durée comprise entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement. Malheureusement, cette méthode n'est pas toujours disponible. Pour cela, il existe plusieurs formules empiriques couramment utilisées pour l'estimation du temps de concentration d'un bassin versant selon sa taille. Ces dernières sont basées sur des paramètres morphométriques. La formule de Giandotti est la

plus adéquate pour les bassins de taille moyenne (Sall, 2013. Hasbaia et al., 2015). Elle s'exprime comme suit :

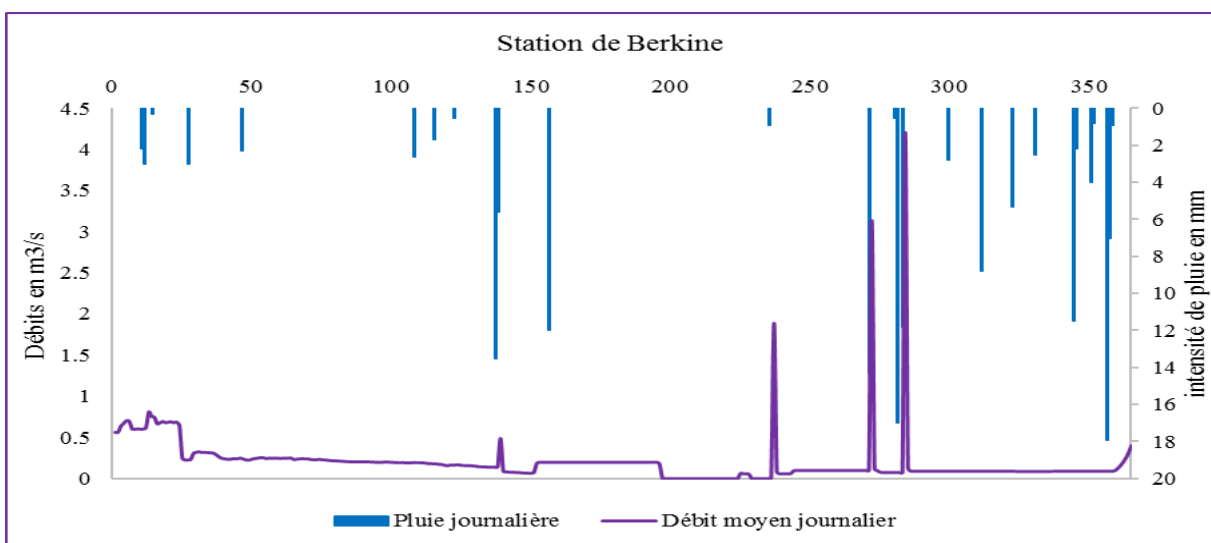
$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy}}}$$

Avec :  $t_c$  : Temps de concentration en heure ;  $A$  : Superficie du bassin ( $Km^2$ ) ;  $L$  : Longueur du plus long thalweg (Km).  $H_{moy}$  : altitude moyenne (m)

Le temps de concentration estimé au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou est de 10h 25min ; cela indique une réponse hydrologique assez lente face à un évènement pluviométrique. Il semble que ce chiffre est significatif vu la taille, la longueur du cours d'eau principal, la forme allongée du bassin, la perméabilité du terrain et la couverture végétale importante en amont.

#### 4.1.9 Relation pluie-débit

Les précipitations qui tombent en amont sont l'origine des crues observées en aval. De ce point de vue, la corrélation pluie-débit à Guercif ou à Belfarah et même à Berkine, la station située dans un synclinale à l'abri des précipitations, sera très faible. En effet, les valeurs les plus élevées des pluies sont enregistrées sur les sommets montagneux ou sur les versants ouest du bassin, vers Maghraoua et Bab Larbaa, où on ne dispose pas d'informations hydropluviométriques.



**Figure 96 : Relation pluie/débit au niveau de la station de Berkine**

#### 4.1.10 Décomposition de l'hydrogramme de crue (Quelques concepts)

L'hydrogramme est la représentation graphique du débit instantané d'un cours d'eau en fonction du temps à l'exutoire d'un bassin versant. Il constitue le concept de base en hydrologie. Il est également utilisé pour montrer les effets sur l'hydrologie de projets existants ou proposés ou de changements d'utilisation des terres (Rocha, 2014). Les trois paramètres fondamentaux qui définissent entièrement l'hydrogramme sont :

**Temps de montée** : correspond à la durée de la partie montante (courbe de concentration ou de montée) ou le temps que prend le débit depuis le début du ruissellement de surface pour atteindre son maximum. Ce temps, qui représente une caractéristique de l'hydrogramme, peut être mesuré lors des précipitations relativement de courte durée aboutissant ainsi à un hydrogramme simple.

**Temps de base** : correspond à la durée totale de la courbe de montée et à la partie de décroissance rapide, dite courbe de décrue. Il est équivalent à l'intervalle de temps que durent les contributions du ruissellement de surface et de l'écoulement hypodermique.

**Débit de pointe** : Débit maximal instantané d'un hydrogramme donné.

Quant à nous, les enregistrements des débits instantanés ne sont disponibles, pour cela on s'est basé sur les débits moyens journaliers pour établir l'hydrogramme de crue (Fig. 97).

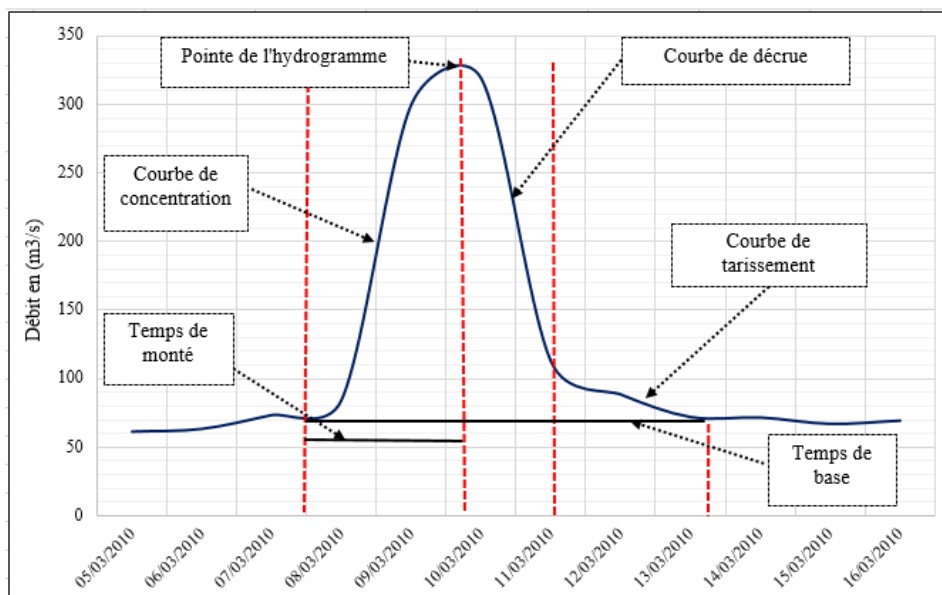


Figure 97 : Décomposition de l'hydrogramme de crue de 05/03 à 16/03/2010

## **4.2 Analyse des débits d'étiage**

Les travaux sur les crues ont été prédominants par le passé dans l'analyse des extrêmes hydrologiques, mais les pressions sur la ressource en eau et les incertitudes liées au changement climatique suscitent, depuis quelques années, un intérêt croissant pour l'analyse des étiages (Obda, 2004).

L'étiage est une forme extrême de l'écoulement qui affecte la vie des cours d'eau. Durant le cycle hydrologique, l'étiage est le chaînon clé pour comprendre à la fois l'hydrosystème, et l'écosystème des oueds méditerranéens, car les étiages aigus constituent un seuil critique à la flore et la faune fluviale. Les étiages se différencient des basses eaux à la fois par leur durée, par leur fréquence et par leur gravité ou profondeur (Obda, 2004).

Ce phénomène correspond à une diminution du débit des oueds, voire leur assèchement sur une certaine période (Garcia, 2016). L'impact de l'étiage sur le volume d'eau disponible peut entraîner de nombreux problèmes économiques, sociaux et environnementaux (Obda, 2004). Pour cette raison, le phénomène d'étiage est donc une préoccupation majeure pour de nombreux pays, à travers le problème d'une meilleure gestion de la ressource en eau (prévision et prédétermination) et une meilleure compréhension des processus qui influent sur ce phénomène et de leurs évolutions, notamment dans le contexte de changement climatique actuel et d'augmentation continue des prélèvements en eau.

### **4.2.1 Genèse des étiages**

Les étiages sont le résultat d'un déficit d'alimentation des cours d'eau. Le manque des précipitations, les températures élevées, la forte activité évaporatoire et les intenses prélèvements de l'eau pour l'agriculture coïncidant avec la période estivale sont les principales conditions de la genèse du phénomène des étiages de l'Oued Melloulou.

Ainsi, les débits d'étiage renvoient aux apports des nappes souterraines. Le baissement des niveaux de ces dernières n'intervient pas pour soutenir l'écoulement superficiel dans le bassin.

Les critères utilisés pour décrire l'étiage sont très variés. Ils dépendent des caractéristiques de chaque bassin versant, des appréciations de chaque auteur et aussi des objectifs de l'étude des étiages : gestion d'un réservoir, étude de la pollution de l'eau, étude de la sécheresse ... (Mouhdi, 1993).

#### 4.2.2 Apparition des débits mensuels d'étiage (QMNA).

La variable classiquement utilisée pour caractériser les étiages des cours d'eau est le QMNA, débit moyen mensuel le plus bas de l'année. Cette variable est très significative par rapport aux étiages extrêmes annuels et au DCE (Obda. 2004 et Taous et al, 2009). Au niveau des Oueds sud méditerranéens, les étiages apparaissent le plus souvent en période estivale, voire automnale, (Qadem, 2015); c'est le cas au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou. Cependant, ce phénomène peut apparaître dans n'importe quel mois avec des fréquences rares. Les processus inhérents à leur genèse peuvent remonter aux saisons antérieures. Cette genèse particulièrement longue explique la difficulté à déterminer les facteurs de leur apparition et de leur sévérité.

**Au sein de la série de Berkine :** Sur les 25 ans d'enregistrements étudiés (1990/1991-2014-2015), 52% des étiages apparaissent en automne, 28% en été, notamment en août, et 12% en hiver (Tab 64).

**Pour les données de la station de Guercif :** sur la même période traitée, 62 % des étiages surviennent en été et 32 % en automne. Presque la même répartition est observée au niveau de la station de Belfarah (Tab. 64).

**Tableau 64 : Fréquence d'apparition des QMNA selon les mois de l'année (1990/1991-2014-2015)**

	Nombre d'étiage					
	Berkine		Belfarah		Guercif	
	Nombre de mois	Fréquence en %	Nombre de mois	Fréquence en %	Nombre de mois	Fréquence en %
Septembre	<b>4</b>	16	<b>5</b>	20	7	28
Octobre	<b>5</b>	20				
Novembre	<b>4</b>	16	<b>1</b>	4	1	4
Décembre	<b>1</b>	4				
Janvier	<b>3</b>	12	<b>1</b>	4	1	4
Février			<b>1</b>	4		
Mars						
Avril			<b>2</b>	8		
Mai						
Juin			<b>1</b>	4	1	4
Juillet	<b>1</b>	4	<b>5</b>	20	8	32
Août	<b>7</b>	28	<b>9</b>	36	7	28

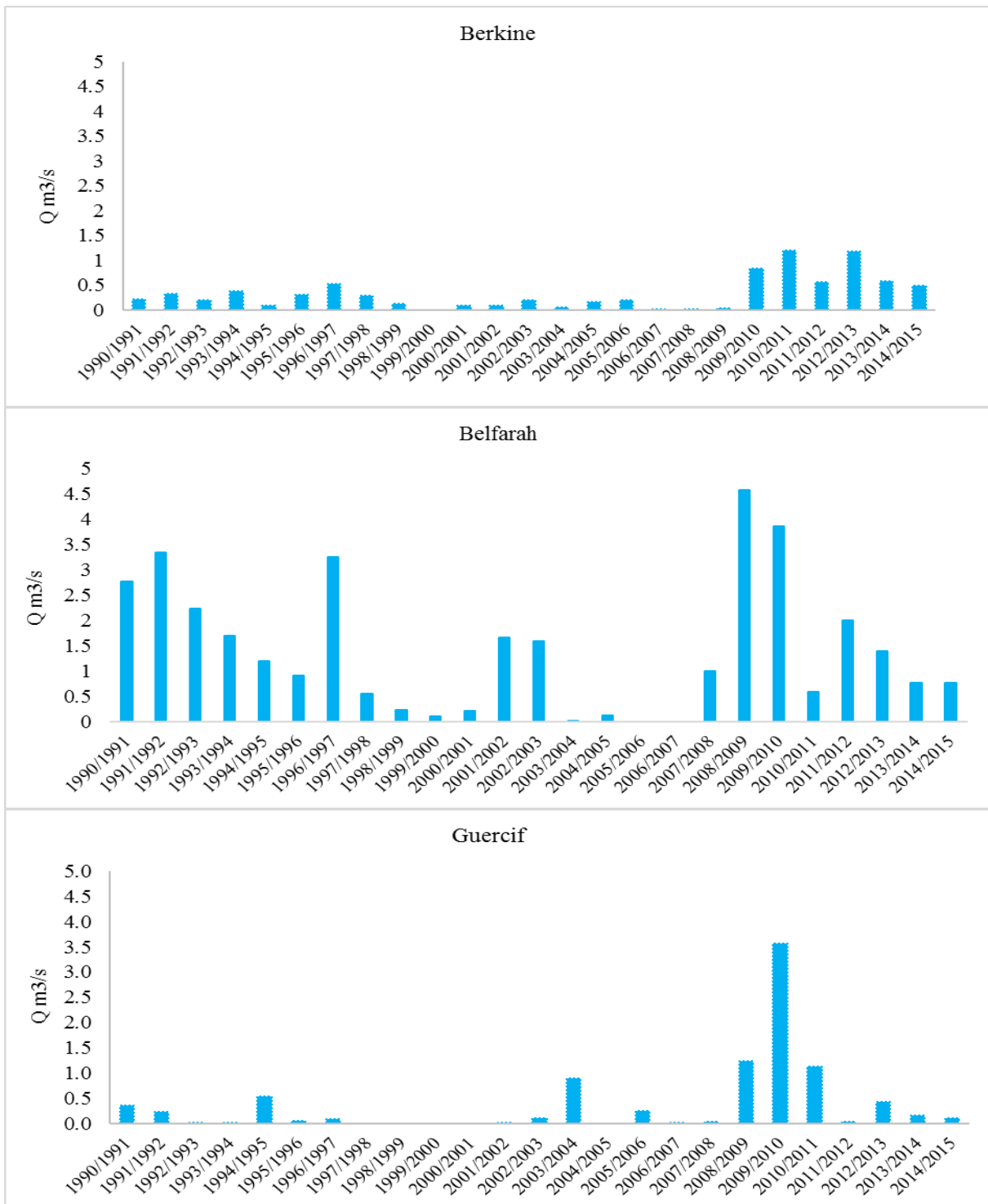
#### **4.2.3 Variabilité des débits mensuels d'étiage (QMNA).**

L'analyse des séries des débits d'étiage, débits moyens mensuels les plus bas de l'année (QMNA), montre une variabilité spatiotemporelle importante. Les coefficients de variation calculés sur la durée choisie sont très élevés ; ils atteignent une valeur de 203% au niveau de la série de Guercif qui est près que le double de celles enregistrées à Berkine et à Belfarah. Les valeurs des débits moyens d'étiage sont très faibles avec un maximum de 1.4 m<sup>3</sup>/s enregistré à Belfarah (Tab. 65). Une partie importante de ces apports liquides sont prélevés pendant la période estivale pour l'irrigation des terres agricoles qui se répartissent le long du cours d'eau principal et de ces affluents.

**Tableau 65 : Variabilité temporelle des QMNA enregistrés au niveau des 3 stations**

	<b>Période d'observation</b>	<b>Moyenne en m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Ecartype</b>	<b>CV%</b>
<b>Berkine</b>	1990/1991 - 2014/2015	0.33	0.33	102
<b>Belfarah</b>	1990/1991 - 2014/2015	1.39	1.3	93
<b>Guercif</b>	1990/1991 - 2014/2015	0.37	0.75	203

Les résultats des tests de détection des ruptures affichent un point de changement de tendance en 2007/2008 au niveau des séries de Berkine et de Guercif. Sa significativité selon le test de Buishand est forte au niveau de la série de Berkine qu'à Guercif. Les modules des débits d'étiage ont augmenté après les ruptures observées. En effet, le module calculé entre 1990/1991-2006/2007 à Berkine est de 0.19 m<sup>3</sup>/s. Alors qu'elle atteint 0.6 m<sup>3</sup>/s entre 2007/2008-2014/2015. La même remarque pour Guercif avec un module de 0.15 m<sup>3</sup>/s calculé entre 1990/1991-2007/2008 et de 0.84 m<sup>3</sup>/s entre 2007/2008-2014/2015. Il convient de noter qu'aucune rupture n'a été détecté au niveau de la série de Belfarah .



**Figure 98 : QMNA enregistrés au niveau des 3 stations choisies**

En revanche, les modules des débits d'étiage présentent une tendance vers l'augmentation non significative au niveau des stations de Berkine et de Guercif. Les valeurs Z du test de Mann Kendall sont positives (Tab. 66). Elles sont de 0.65 à Berkine et de 1.34 à Guercif. En revanche, la série de Belfarah présente une tendance non significative vers la diminution. Ce constat est du peut-être à la qualité des données mesurées dans ce site.

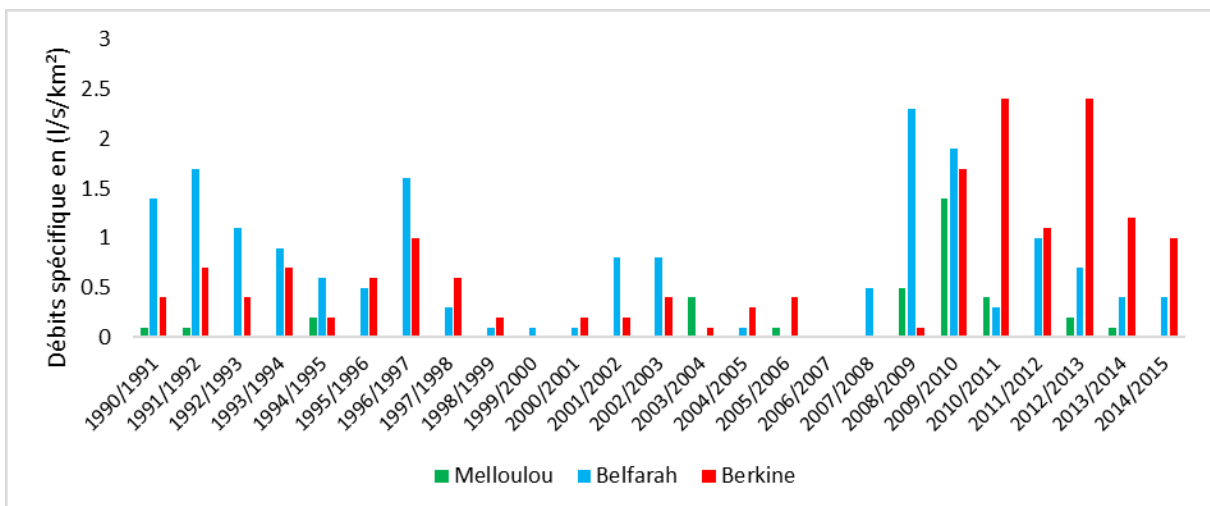
**Tableau 66 : Tendances des QMNA enregistrés à Berkine et à Guercif**

	Période	Z de Mann kendall	Pente de Sen
<b>Berkine</b>	1991 - 2015	0.65	0.007
<b>Belfarah</b>	1991 - 2015	-1.38	-0.05
<b>Guercif</b>	1992 - 2015	1.34	0.04

En comparaison avec le débit moyen annuel, nous retiendrons que l'écoulement d'étiage, reste soutenu dans la partie amont par rapport à l'exutoire, grâce à l'existence d'un réseau de sources resurgissant dans les roches carbonatées, calcaires et dolomitique, en plus de la fonte de neige sur les sommets montagneux pendant cette période estivale. Le très faible débit d'étiage enregistré à l'exutoire du bassin versant est dû aux prélèvements des eaux par les séguias d'irrigation ainsi qu'aux températures élevés qui provoquent une forte demande climatique en vapeur d'eau, et à la rareté des pluies pendant la saison estivale et automnale malgré leur forte intensité.

#### 4.2.4 Débits spécifiques d'étiages

Exprimés en l/s/km<sup>2</sup>, les débits spécifiques d'étiage désignent le rendement de chaque km<sup>2</sup> du bassin en matière des ressources en eau en période d'étiage. Les résultats obtenus des enregistrements, issus de l'Agence du Bassin Hydraulique de Moulouya, des trois stations situées dans le bassin de Melloulou durant la période de référence 1990/1991 à 2014/2015 ont été présentés dans la figure ci-dessous.



**Figure 99 : Débits spécifiques d'étiages calculés au niveau des 3 stations**

Les valeurs estimées des débits spécifiques sont très faibles avec une variation observée d'un site à un autre (Fig. 99) :

**La station de Berkine** ; située en mont sur l'Oued Zebzit et contrôlant un sous bassin de 500 km<sup>2</sup>, présente un débit spécifique inférieur à 0.5 l/s//km<sup>2</sup> dans 52% des cas. Alors que 20 % des années ont un débit spécifique entre 0.5 et 1 l/s//km<sup>2</sup> et seulement 12 % des années ont un rendement supérieur à 1.5 l/s//km<sup>2</sup> (Tab. 66). La valeur la plus élevée de débit spécifique à Berkine est de 2.4, observée en 2010/2011 et en 2012/2013 (Tab. 66).

**La série de la station de Belfarah**, située à environ 18 km au nord de la confluence de l'Oued Melloulou avec et l'Oued Zebzit contrôle un sous bassin de 2000 km<sup>2</sup>. Pour cette série, 84 % des années ont un débit spécifique inférieur à 1.5 l/s/km<sup>2</sup>, dont 40 % inférieur à 0.5 et 32% inférieur à 1 (Tab. 67). La valeur maximale du débit spécifique égale à 1.9 l/s/km<sup>2</sup> est enregistrée pendant l'année 2009/2010 (Tab. 67)

**La station de Guercif**, située à l'exutoire, contrôle donc la totalité du bassin et enregistre les étiages les plus sévères. En effet, 92% des années ont un rendement inférieur à 0.5 l/s/km<sup>2</sup> (Tab 67) avec une valeur maximale de 1.4 l/s/km<sup>2</sup> notée en 2009/2010. Le nombre d'année présentent un tarissement total du cours d'eau à Guercif, est de 13 ans, plus de 50% de la période étudiée. L'effet anthropique contribue largement dans ce tarissement aigu de l'Oued Melloulou.

**Tableau 67 : Seuils des débits spécifiques d'étiages au niveau des 3 stations**

	0 - 0.5	Pourcentage	0.5 - 1	Pourcentage	1 - 1.5	Pourcentage	> 1.5	Pourcentage
<b>Melloulou</b>	23	92 %	1	4 %	1	4 %		
<b>Belfarah</b>	10	40 %	8	32 %	3	12 %	4	16 %
<b>Berkine</b>	13	52 %	5	20 %	4	16 %	3	12 %

#### **4.2.5 Débits d'étiage issus de la courbe des débits classés**

Les valeurs extraites de la courbe des débits classés, appelées également « débits caractéristiques », permettent d'aborder les étiages d'une manière simple, sans traitement statistique élaboré, et de représenter les débits les plus indigents (Delus, 2011).

Les débits caractéristiques d'une durée de 10, 9, 6, 3 et 1 mois (DC<sub>x</sub>), notés respectivement DC<sub>10</sub>, DC<sub>9</sub>, DC<sub>6</sub>, DC<sub>3</sub> et DC<sub>1</sub>, correspondent aux débits dépassés respectivement 305, 275, 182, 90 et 30 jours dans l'année. Ainsi, le débit caractéristique d'étiage (DCE), correspond au

débit égalé ou non dépassé 10 jours par an. Ces valeurs caractéristiques peuvent également s'exprimer en pourcentage en utilisant des valeurs dépassées de 90, 75, 50 et 25% de l'année. La courbe des débits classés permet d'obtenir directement des débits moyens « extrêmes » au sens statistique du terme.

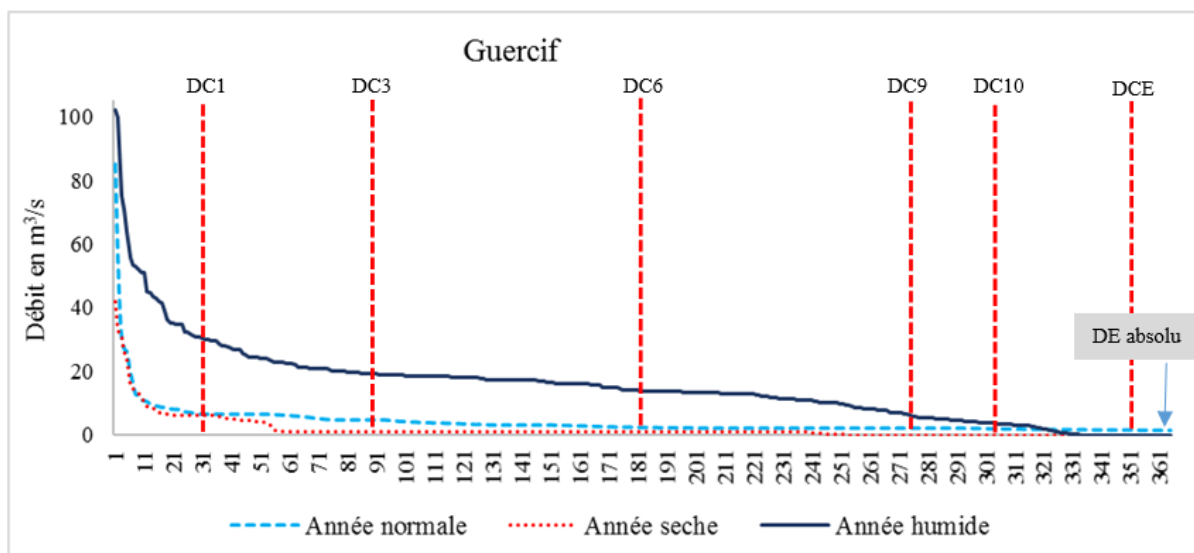
#### 4.2.5.1 Etiage absolu

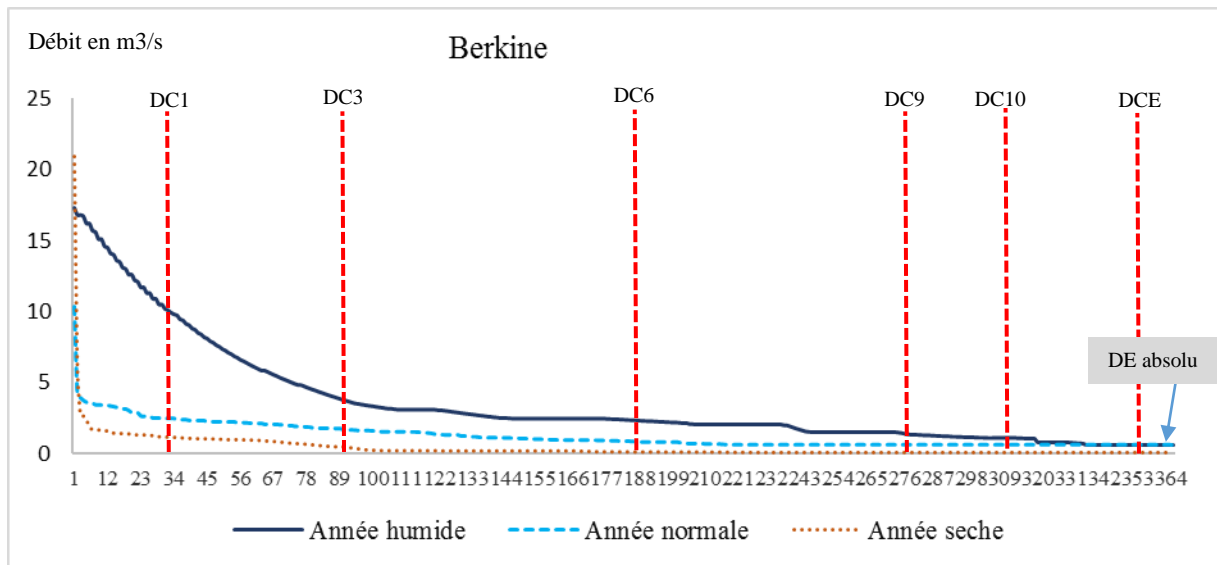
L'étiage absolu (ou minimum absolu) ne nécessite pas l'élaboration de la courbe des débits classés, mais il se fonde sur tous les débits moyens journaliers disponibles : il représente le plus bas débit connu d'un cours d'eau.

#### 4.2.5.2 Débits caractéristiques

Pour extraire ces débits caractéristiques on s'est appuyé sur les données des stations de Berkine (station qui présente la partie amont) et de Guercif (située à l'exutoire du bassin) (Fig. 100).

**Au niveau de la station de Guercif ;** pour une année sèche, les débits journaliers sont inférieurs ou égaux à 1 m<sup>3</sup>/s sur une durée de 9 mois, dont les débits moyens journaliers deviennent nulle sur une durée de 90 jours (Fig 85). Ces valeurs peuvent dépasser les 6 m<sup>3</sup>/s sur une durée de 30 jours seulement. Cependant, le DCM, le débit classé maximal, égal 42m<sup>3</sup>/s (Tab. 68).





**Figure 100 : Courbes des débits classés de la station hydrométrique de Guercif et de Berkine**

**Tableau 68 : Valeurs des débits caractéristiques déterminées**

Guercif	DC1	DC3	DC6	DC9	DCE	Etiage annuel absolu
<i>Année humide</i>	30.8	19.1	14.1	7.06	1.46	0.3
<i>Année normale</i>	6.59	4.7	2.37	2.11	0	0
<i>Année sèche</i>	6	1	1	0	0	0
Berkine	DC1	DC3	DC6	DC9	DCE	Etiage annuel absolu
<i>Année humide</i>	10.5	3.78	2.42	1.52	0.6	0.6
<i>Année normale</i>	2.48	1.7	0.881	0.6	0.6	0.575
<i>Année sèche</i>	1.21	0.499	0.148	0.1	0.1	0.079

Pour une année normale, les débits journaliers sont inférieurs à 5 m<sup>3</sup>/s sur une durée de 9 mois et au-dessous de 2.5m<sup>3</sup>/s pour 6 mois. Pour une année humide, l'écart entre la valeur de DCM et de DCE est égal 101,7 m<sup>3</sup>/s. En revanche, les débits moyens journaliers sont plus ou moins élevés, ils dépassent 7 m<sup>3</sup>/s sur une durée de 9 mois et environ 1.5 m<sup>3</sup>/s sur 355 jours.

Dans un milieu agricole par excellence basé essentiellement sur les apports de l'Oued, ces valeurs de débits sont toujours inférieures de satisfaire les besoins des nomades. Ainsi, la demande climatique en vapeur d'eau est aussi élevée durant toute l'année, engendrant ainsi des pertes en eaux, notamment pendant la période estivale et automnale.

**Au niveau de la station de Berkine :** les écarts des débits d'étiages entre une année sèche, normale et humide sont plus ou moins réduits. L'alimentation de ce sous bassin par les sources de la nappe phréatique garde un certain équilibre d'écoulement au niveau du cours

d'eau, en plus de la rareté des prélèvements des eaux pour des fins agricoles et les faibles températures enregistrées en amont par rapport à la zone avale.

#### **4.2.6 VCNd au pas de temps journalier :**

L'analyse des débits d'étiage à partir des modules mensuels, QMNA, peut masquer des situations d'étiage très sévères (Qadem, 2015). Il s'agit d'une valeur facile à extraire, mais elle peut être peu représentative d'un étiage car elle est soumise à l'échelle calendaire. Les débits d'étiage peuvent en effet être observés durant une période chevauchant sur deux mois, induisant une surestimation du débit d'étiage par le QMNA. Pour cette raison, il est préférable et opportun d'utiliser un pas de temps inférieur pour caractériser les étiages des cours d'eau étudiés, afin de limiter l'influence des précipitations.

La variable VCNd qui désigne les débits moyens journaliers consécutifs les plus bas de chaque année sur une durée (d), obtenue à partir des débits moyens journaliers, est la plus répandue dans la littérature hydrologique (Lang, 2007).

Sur une période de 2000/2001 à 2009/2010, cette variable a été calculée pour une durée de  $d = 1, 3, 6, 10$  et  $30$  jours aux données de Berkine et de Guercif. Les résultats obtenus montrent que les écarts entre les variables calculées sont très limités. En effet, la superposition des courbes de ces dernières montre la même allure. En moyenne, l'écart entre les valeurs de  $VCN_1$  et  $VCN_{30}$  est de  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  à Guercif, et de  $0.063 \text{ m}^3/\text{s}$  à Berkine (Fig. 102). Ces résultats présentent une stabilité importante des débits d'étiage pendant la période estivale et automnale. Cette situation peut être expliquée par la faible qualité des données jaugées.

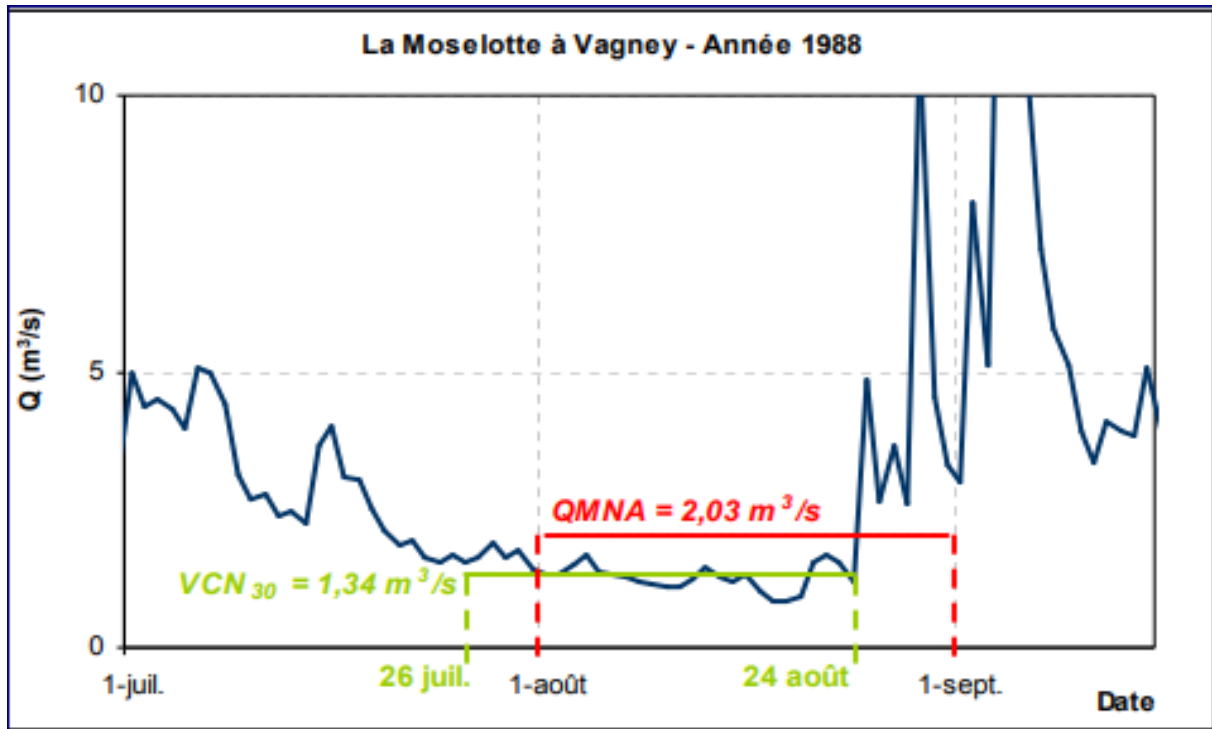


Figure 101 : Différence entre QMNA et VCN30, cité par (Lang, 2011)

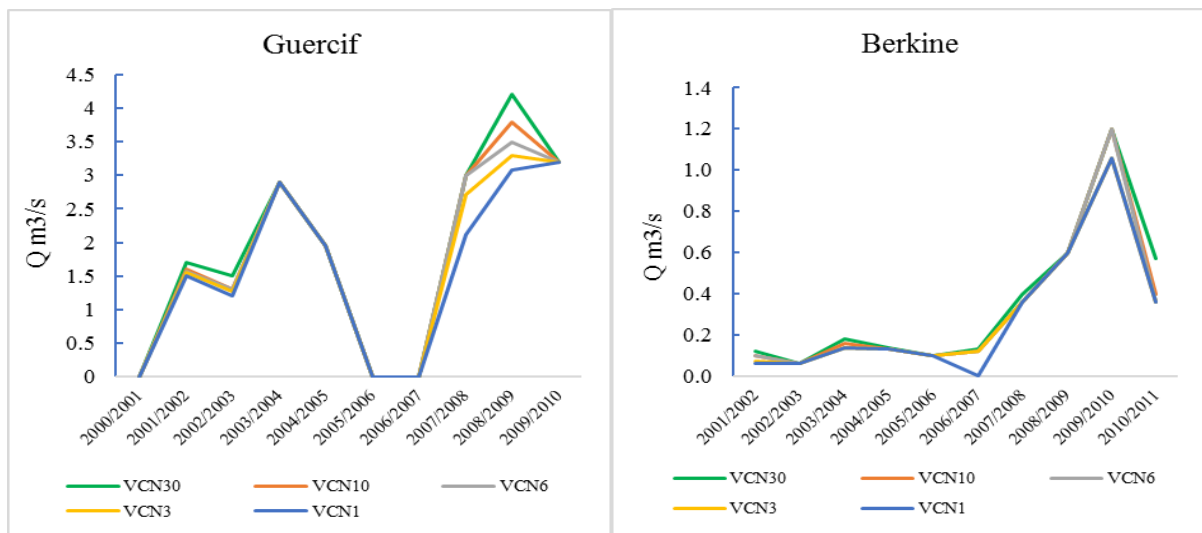
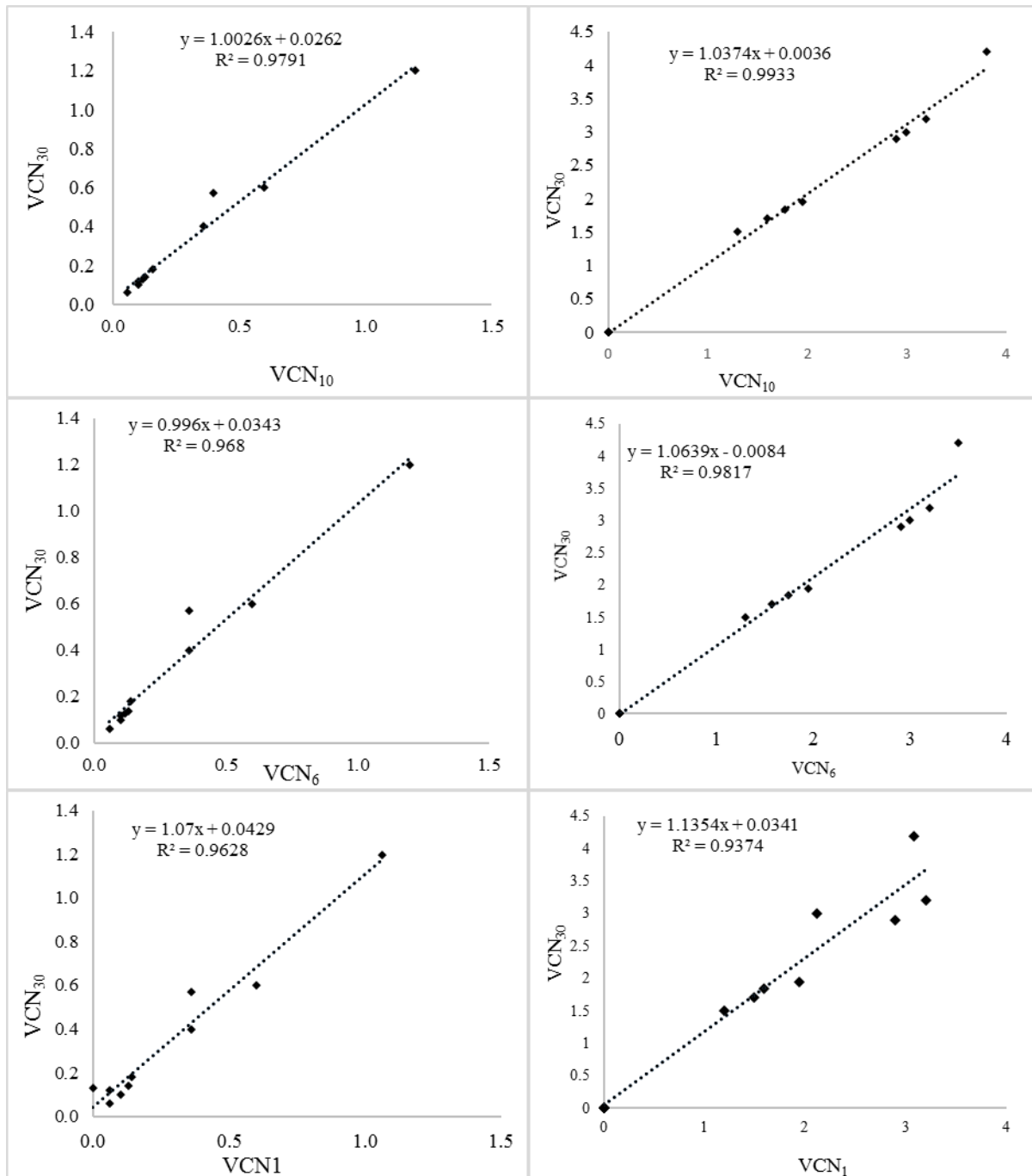


Figure 102 : Courbes des VCN1, 3, 6, 10 et 30 tracées pour les données de Berkine et de Guercif

Les fortes valeurs de coefficient de corrélation entre les différentes échelles temporelles de VCN confirment cet aspect de stabilité des périodes d'étiage au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou (Fig. 103).

La comparaison entre les QMNA et les VCN<sub>30</sub> est importante, car ces deux indicateurs se rapprochent de l'échelle mensuelle. Ces deux grandeurs devraient être proches, mais dans certains contextes des écarts importants peuvent apparaître, notamment lors d'années

pluvieuses et dans le cas de bassins imperméables qui ont une réponse rapide aux impulsions pluviométriques.



**Figure 103 : Relations entre les VCN Berkine à gauche et ceux de Guercif à droite**

Dans notre bassin versant, la couverture lithologique a une perméabilité plus ou moins forte et la rareté de la pluviométrie pendant l'été expliquent, en générale, les faibles écarts entre les QMNA et les VCN<sub>30</sub> (Tab. 69).

**Tableau 69 : Comparaison entre les valeurs de QMNA et celles de VCN30 (Stations de Berkine et de Guercif)**

	<i>Berkine</i>			<i>Guercif</i>		
	<i>QMNA</i>	<i>VCN30</i>	<i>Ecart</i>	<i>QMNA</i>	<i>VCN30</i>	<i>Ecart</i>
<i>2001/2002</i>	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>2002/2003</i>	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
<i>2003/2004</i>	0.1	0.0	0.1	0.9	0.7	0.2
<i>2004/2005</i>	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
<i>2005/2006</i>	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
<i>2006/2007</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>2007/2008</i>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<i>2008/2009</i>	0.0	0.0	0.0	1.2	0.9	0.3
<i>2009/2010</i>	0.8	0.6	0.2	3.6	2.8	0.8
<i>2010/2011</i>	1.2	0.6	0.6	1.1	1.1	0.0

#### **4.2.7 Indice de sévérité des étiages (ISE)**

Cet indice est largement utilisé pour tester la sévérité d'étiage et de la sécheresse pour chaque année (Sertou, 1995 et Obda, 2004), il s'exprime par l'équation suivante :

$$ISE = QMNA / Qm * 100$$

Avec : *QMNA* est le débit mensuel minimal ; *Qm* : est le module annuel

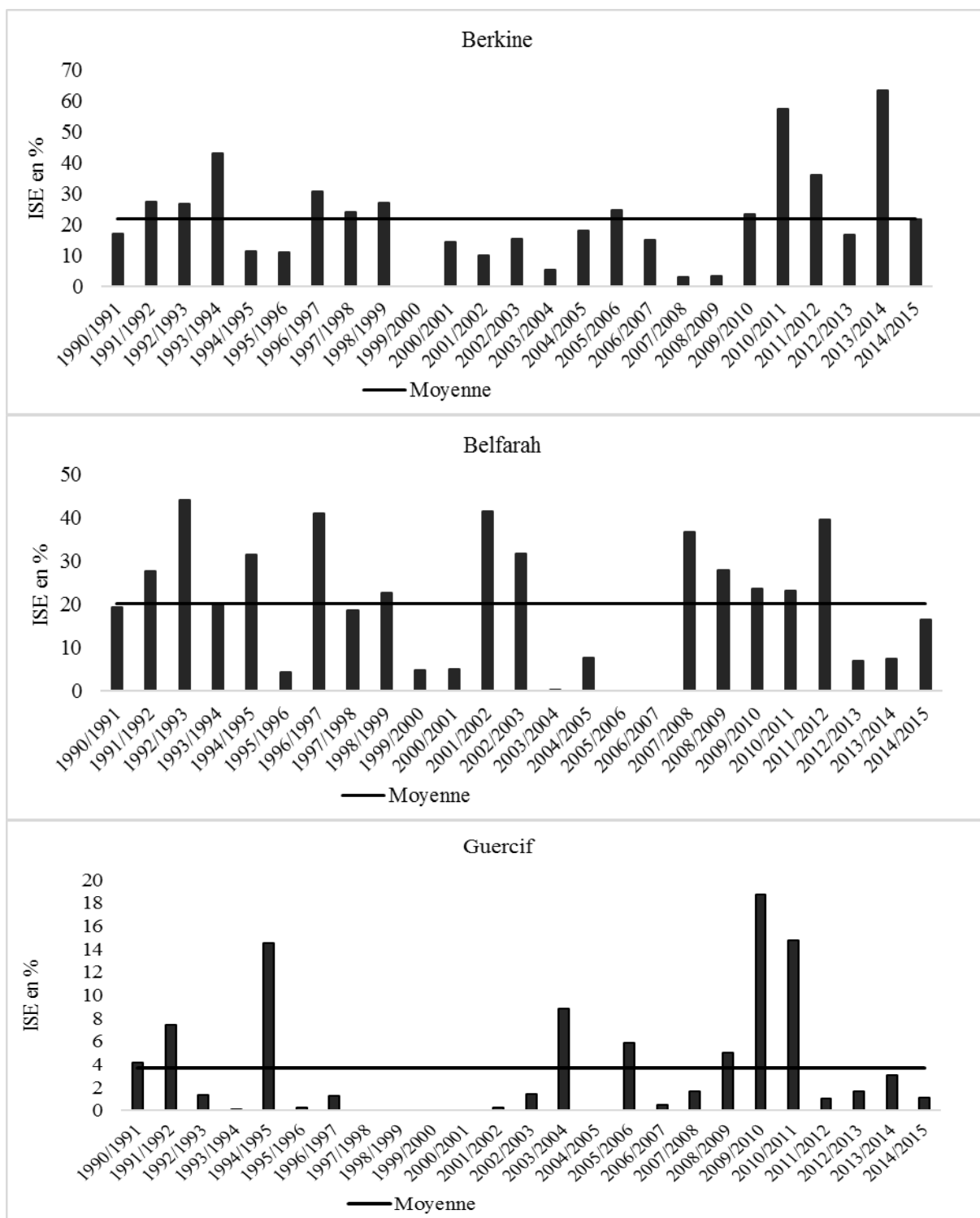
Tant que le rapport entre le débit mensuel minimal et le module annuel est plus élevé, on dit que la "ISE" est faible, alors que dans le cas contraire la sévérité des étiages est plus forte (Obda, 2004).

Les graphiques ci-dessous montrent une variabilité temporelle de la sévérité d'étiage en fonction de la nature d'écoulement influencée par des facteurs physiques tels que la structure géologique, la couverture lithologique, les précipitations, la température..., ainsi que par les effets anthropiques tels que les prélèvements de l'eau et tous les aménagements hydroagricoles.

Quant à nous, les étiages les plus prononcés ont été observés au niveau de la station de Guercif avec 68% d'années inférieurs à la moyenne calculée. Alors que 56% des années sont inférieurs à la moyenne à Berkine (Fig. 104).

Les valeurs les plus élevées de la sévérité d'étiage sont celles de Berkine, avec un maximum de 63% calculé en 2013/2014 ; c'est l'année la plus humide de la série. Néanmoins, à Belfarah la valeur la plus haute est de 44 % en 1992/1993, alors que la valeur maximale de ISE ne dépasse pas 19% à Guercif en 2009/2010. Il semble donc qu'il y a une augmentation de la sévérité d'étiage de l'amont vers l'aval ce qui concorde avec l'expansion des terres

agricoles irriguées par les apports de l'Oued et l'augmentation des températures maximales, qui est annoncé dans le chapitre précédent (Fig. 104).



**Figure 104 : Diagrammes de la sévérité des étages (ISE) dans les 3 stations**

## 5 Variabilité spatiale des écoulements dans le bassin versant

Au Maroc, la couverture des bassins versants en stations de mesures est très faible. Dans ce contexte, les jaugeages des débits instantanés, effectués sur le terrain, constituent un outil primordial pour combler cette lacune d'une part, et de pour montrer les variations spatiales des débits de l'amont vers l'aval dans un bassin versant d'autre part. Ainsi, ce type de mesures nous permet de spatialiser les rendements des sous bassins versants en matière des ressources en eaux pendant des différentes périodes « Hautes et basses eaux ».

Au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou qui couvre une superficie de 2500 km<sup>2</sup>, seules 3 stations de mesures hydrométéorologiques sont installées, la station de Berkine sur l'Oued Zebzit, Belfarah à 18 km en aval de la confluence de l'Oued Melloulou et de Zebzit et la station de Guercif Melloulou qui s'installe à l'exutoire. Ajouter à la qualité discutée des données produites au niveau de ces stations hydrométriques. Pour tout cela, nous avons effectué un certain nombre de campagnes de jaugeages les jaugeages qui nous aident à comprendre l'organisation spatiale des écoulements.

Plusieurs méthodes de jaugeages de débit ont été utilisé par les chercheurs en hydrologie. Le choix de la méthode est basé essentiellement sur la précision demandée, les moyennes disponibles, la vitesse et le type de l'écoulement et la taille du cours d'eau. Parmi ces méthodes, nous avons choisis le jaugeage par l'exploration des champs de vitesses à travers un moulinet hydrométrique (Photo 9).

La base de cette méthode est le produit de la vitesse moyenne de l'écoulement et de l'aire de la section transversale, mouillée, perpendiculaire à la principale direction de l'écoulement.

Débit ( $Q$ ) = surface de la section mouillée ( $A$ ) en m<sup>2</sup> \* Vitesse moyenne de l'écoulement dans cette section ( $V$ ) en m/s.

### 5.1 Etapes de jaugeage de débit

La détermination de la surface mouillée, de la vitesse moyenne d'écoulement et le calcul du débit sont faits comme suit :

❖ **Étape 1** : La section transversale est subdivisée en sous-sections. Le nombre des sous-sections est choisi selon la largeur du chenal du cours d'eau, ainsi que selon la précision demandée dans les résultats finals. En général, pour les grands cours d'eau naturels et afin



Photo 9 : Jaugeage par exploration du champ de vitesses à travers un moulinet hydrométrique en aval de l'oued Zebzit

d'avoir le profil correct du fond de la vallée et sa géométrie, il est préférable de ne pas dépasser 0.5 m de largeur pour chaque petite section. La surface de chaque sous-section est déterminée directement en mesurant la largeur à travers un décamètre tendu au travers de l'eau, au-dessus de la section mouillée et la profondeur mesurée couramment en utilisant des marques ou des graduations sur la perche de jaugeage (Obda, 2004, Qadem, 2015 et Qadem, 2020).

❖ **Étape 2** : La vitesse dans chaque sous-section est évaluée en utilisant un instrument et une méthode adaptés. On utilise le plus souvent un moulinet hydrométrique.

❖ **Étape 3** : Le débit de chaque sous-section est calculé en multipliant l'aire de la sous-section ( $A_i$ ) par la vitesse moyenne ( $V_i$ ) dans la sous-section :  $Q_i = A_i \cdot V_i$ . Le débit total de l'écoulement du cours d'eau dans le même point est alors la somme des débits partiels calculés pour les sous-sections. Le débit total est alors :

$$Q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

## **5.2 Moulinet hydrométrique.**

C'est un appareil utilisé pour mesurer la vitesse de l'écoulement dans un cours d'eau en un point donné (Qadem, 2020). Le principe de fonctionnement d'un moulinet hydrométrique est basé sur la proportionnalité entre la vitesse de l'eau et la vitesse angulaire de son hélice (vitesse de rotation de l'hélice). La vitesse en un point sur la verticale de mesure est obtenue en comptant, sur une durée prédéterminée, le nombre de tours de l'hélice du moulinet monté sur une perche de jaugeage. La vitesse de l'eau en ce point est alors calculée en utilisant l'équation d'étalonnage de l'hélice.

Le moulinet que nous disposons au laboratoire (LAGEA-DD) est d'un axe horizontal « moulinet à hélice ». Ce type de moulinet est livré avec un ensemble d'hélices permettant de mesurer différentes gammes de vitesse d'eau. Le moulinet à axe horizontal perturbe moins l'écoulement lors de l'opération de jaugeage.

### **5.2.1 Éléments principaux d'un moulinet**

Les principaux composants d'un moulinet de jaugeage sont : la perche du moulinet, le corps du moulinet, les câbles de connexion et les hélices de moulinet.

✓ **Hélices de moulinet**

Peuvent être en aluminium anodisé, laiton ou plastique résistant aux chocs. Les hélices ont des diamètres et des pas différents. Les diamètres courants d'hélice vont de 25 mm à 125 mm tandis que les pas peuvent aller de 50 mm à 1000 mm. Le pas hydraulique de l'hélice correspond à la distance parcourue par une particule d'eau après un tour d'hélice. La gamme de vitesse que peut mesurer une hélice donnée, dépend de son diamètre et de son pas.

✓ **Perche**

C'est une tige en acier, graduée verticalement en centimètres ou en décimètres. Elle est utilisée pour sonder la profondeur du cours d'eau. À l'extrémité inférieure de la tige, on trouve normalement une semelle ou butée de fond pour empêcher la perche de s'enfoncer dans le fond du cours d'eau. Habituellement, la perche est faite en deux, trois ou quatre parties qui doivent être jointes ensemble.

✓ **Compteur du nombre de tours d'hélice :**

C'est un appareil de comptage électronique, il a un chronomètre intégré. Cet appareil enregistre le nombre de tour de l'hélice en un temps d'exposition prédéfini, 30 s par exemple.

### **5.2.2 Principe de fonctionnement d'un moulinet**

L'écoulement entraîne une rotation de l'hélice du moulinet. Une pièce électronique reliée envoie un signal par chaque tour. Le nombre de tours d'hélice est proportionnel à la vitesse de l'eau au point de jaugeage. L'ensemble des signaux sont enregistré par le compteur connecté. Le nombre de tours, compté pendant un temps prédéterminé, permet de calculer la vitesse en suivant l'équation d'étalonnage de l'hélice :

$$v = k * n + c$$

Avec : **k** : est le pas hydraulique de l'hélice du moulinet en (m) qui est déterminée par des essais de trainage réalisés en canal d'étalonnage ; **n** : est le nombre de tours de l'hélice par seconde ; **c** : constante d'hélice (m/s) qui est déterminée également par des essais antérieurs.

### **5.3 Conditions de fiabilité des jaugeages de débits**

Lorsque les conditions sont favorables, la méthode de jaugeage, de débit du cours d'eau, au moulinet est privilégiée. Pour avoir des résultats fiables, il doit respecter les règlements suivants :

### 5.3.1 Choix du site de jaugeage :

C'est une étape importante de la procédure de mesure de débit qui a un impact crucial sur la qualité des résultats finals. Un bon site de jaugeage doit, autant que possible, présenter les caractéristiques suivantes :

- ✓ Avoir un tronçon plus ou moins rectiligne, avec un écoulement laminaire ;
- ✓ La section transversale doit être uniforme, stable et éloignée de gros rochers, ou tout obstacle qui peut perturber l'écoulement, créer de la turbulence ou interférer avec le moulinet.
- ✓ La section choisie doit avoir des bords ou limites stables pendant la campagne de mesures. Il est préférable de choisir une section plate avec un fond d'une forme de type « U ».
- ✓ La profondeur d'eau doit être suffisante pour assurer une immersion effective du moulinet (normalement plus de 0,1 m) et ne doit pas être très profonde, supérieur à 2 m.
- ✓ Pour toutes les verticales, la direction de l'écoulement doit être perpendiculaire à la section mouillée.

### 5.3.2 Mesure de la largeur de la section transversale

C'est la largeur de la section d'écoulement au niveau de la surface libre de l'eau au moment de la mesure. Cette mesure est effectuée en utilisant un décimètre qui relie deux piquets fixés sur les deux rives du cours d'eau. Ce décimètre doit être perpendiculaire à l'écoulement.



**Photo 10 : Choix du site de jaugeage ; pont de Safsafat sur oued Melloulou**

### 5.3.3 Détermination du nombre des verticales

Pour décrire précisément la forme du fond du cours d'eau et les vitesses horizontales et verticales, il faudrait un nombre suffisant de verticales. Pour des raisons pratiques, on utilise normalement entre 10 et 20 verticales, il est préférable que la distance entre deux verticales successives ne dépasse pas 0.5 m. Cette pratique s'applique aux cours d'eau de toutes les largeurs, à l'exception des chenaux très étroits.

#### **5.3.4 Mesure de la profondeur d'une verticale**

On peut mesurer cette grandeur en utilisant les graduations sur la perche de jaugeage. Pour plus de confiance au niveau des mesures, on doit trouver la position de la perche sur le décimètre, positionner le pied de la perche sur le lit du cours d'eau et maintenir la perche verticale, marquer la surface de l'eau sur la perche avec le doigt et lire le niveau de l'eau à partir du point marqué sur la perche.

#### **5.3.5 Mesure et détermination de la vitesse moyenne sur une verticale :**

La vitesse moyenne sur une verticale est obtenue en mesurant la vitesse en trois points le long de la verticale, suivant une graduation logique entre les points choisis. Cette méthode permet une estimation plus fiable de la vitesse moyenne de l'écoulement.

Toutes les informations et les enregistrements prélevés, sur le terrain, sont écrits sur une fiche de jaugeage spéciale.

#### **5.4 Dépouillement des données**

Les données collectées sur le terrain s'enregistrent au fur et à mesure dans une feuille spéciale, nommée feuille de jaugeage (voir l'annexe). Ce document reflète la réalité de tous les éléments de la section transversale. Le logiciel « GeoOutils » fournit par le Service Géologique National Français et le Bureau de Recherches Géologiques et Minières, BRGM. Il est téléchargeable gratuitement sur le lien <https://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/depjau-depouillement-jaugeages-riviere-calcul> et contient un outil de dépouillement des jaugeages en rivière et calcul de débit d'écoulement nommée « DEPJAU ». Cet outil informatique facilite l'opération de calcul de débit à base des données jaugées sur le terrain et les caractéristiques de l'hélice utilisée. Plus le débit mesuré, ce programme affiche également le profil en travers et la largeur du lit de l'Oued, les champs de vitesse moyenne dans le cours d'eau (Fig. 105).

Concernant les mesures de débits au niveau des « Séguias » et des canaux de déviations en béton armé, la méthode de jaugeage par « flotteur » peut être suffisante pour avoir des bons résultats. En effet, avec un fond lisse et plat, une forme « U » et un écoulement laminaire, la vitesse sera presque la même dans tous les points du canal.

La méthode de jaugeage au seuil est utilisée, ainsi, pour mesurer les débits des petites sources et des petits ruisseaux.

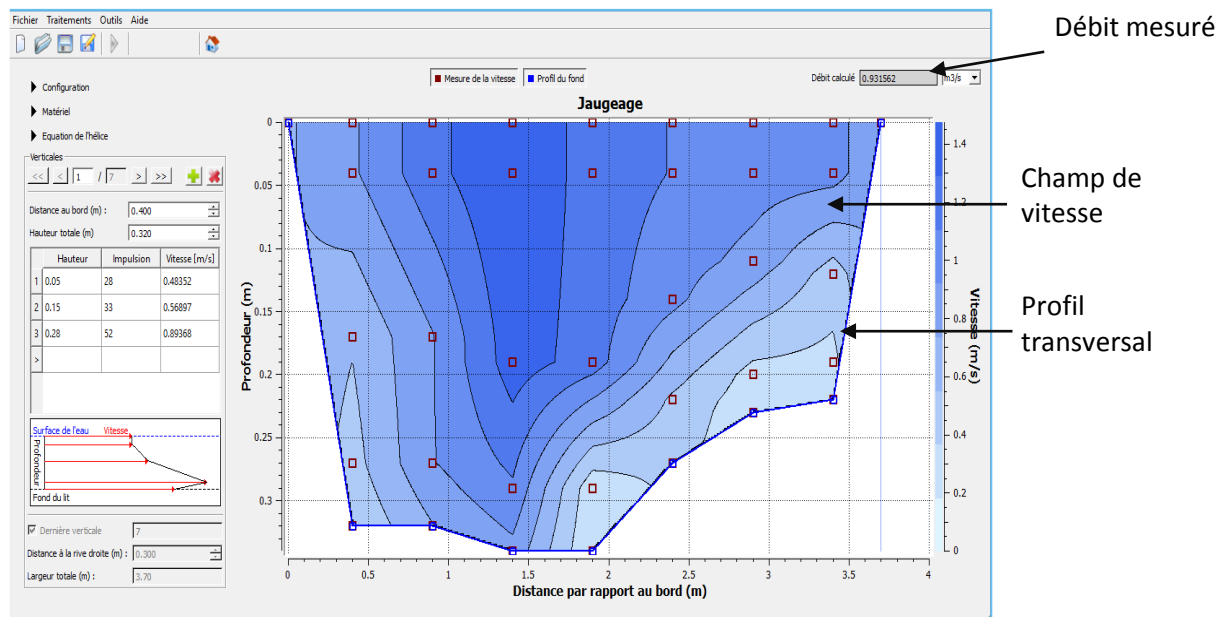


Figure 105 : Exemple d'un profil transversal réalisé sur l'Oued Zebzit

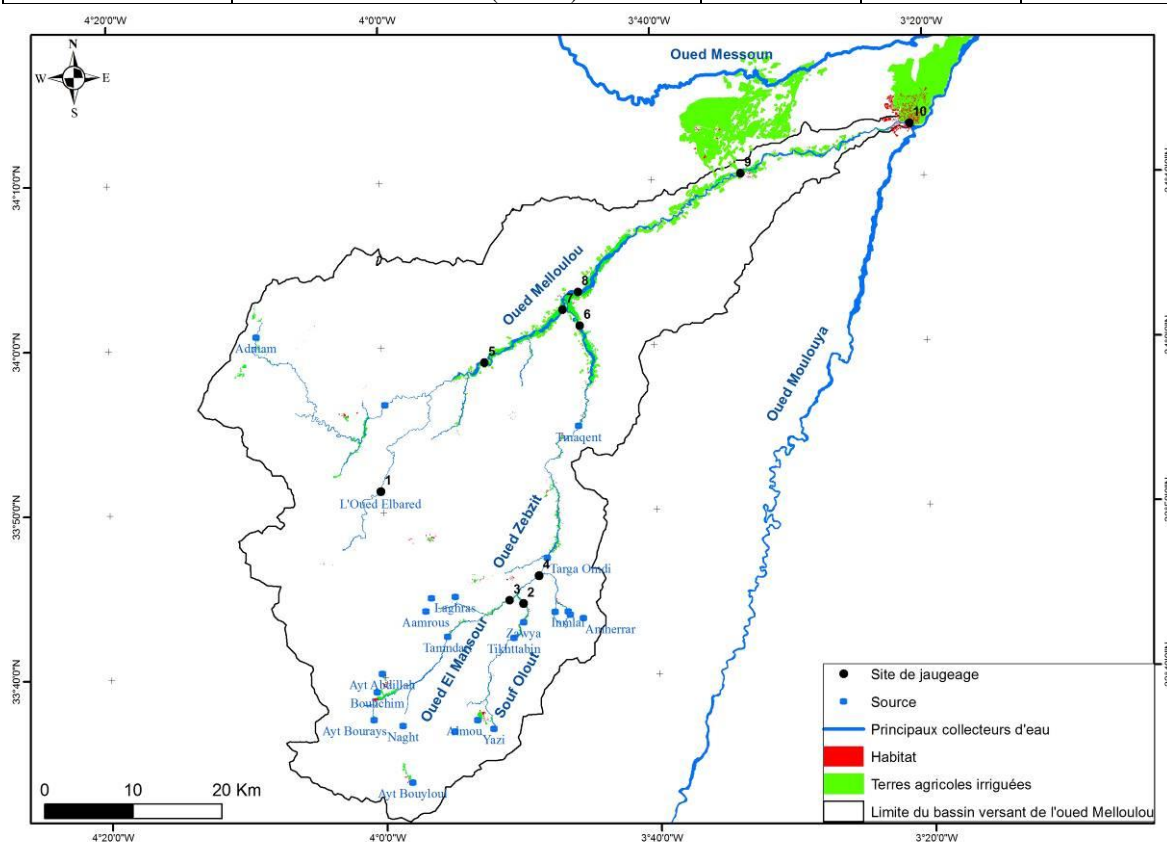
### 5.5 Choix des sites de jaugeages dans le bassin de l'Oued Melloulou

Le choix des sites de jaugeages dans notre bassin est basé principalement sur les points de prélèvements des eaux d'irrigation, sur les confluences des affluents et sur les sites dont les cours d'eau sont plus ou moins rectilignes. Aussi, ce choix est fondé sur l'accessibilité du terrain et le type de chenal.

Malheureusement, les possibilités matérielles et humaines contrôlent pas mal de fois les programmes des sorties de terrain et les jaugeages programmés ne sont pas toujours effectués. En dépit de ces conditions, nous avons réussi à réaliser 60 campagnes de mesure sur 10 sites choisis au niveau du bassin versant entre 2016 et 2018. L'objectif principal des jaugeages est de suivre l'évolution des débits de l'Oued de l'amont vers l'aval et de spatialiser par la suite les rendements des sous bassins. Les sites de jaugeages sont codés de 1 à 10, de l'amont vers l'aval (Tab. 70 et Fig. 106).

**Tableau 70 : Codes, noms et abréviations des sites de jaugeage.**

Code	Nom du site	Abréviation	Longitude	Latitude
1	Oued El Bared (La source)	OB	629261	362461
2	Souf Olout	SO	645331	349903
3	Oued El Mansour	EM	643793	350244
4	Zebzit amont (Berkine)	BR	647090	353034
5	Oued Melloulou (Douar Amzaghrou)	MZ	640945	376938
6	Oued Zebzit Aval (Ras Lakser)	TI	651677	381080
7	Oued Melloulou (Douar Ifrane)	IF	649727	382898
8	Oued Melloulou (Douar Essour)	ES	651474	384863
9	Oued Melloulou (Douar Safsafat)	SA	669810	398200
10	Oued Melloulou exutoire (Guercif)	GR	688849	403883



**Figure 106 : Situation géographique des sites de jaugeages choisis sur le terrain**

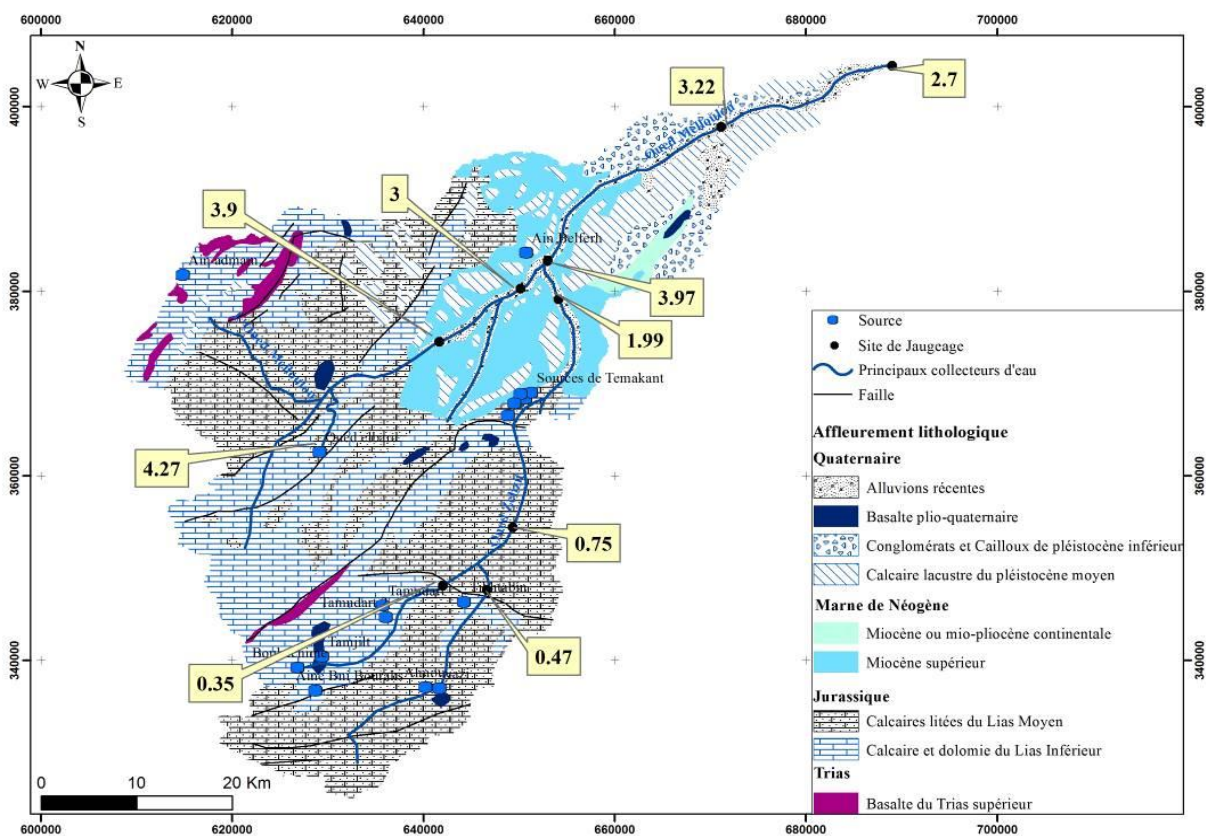
### 5.6 Exploitation des résultats issus des différents jaugeages

Les écoulements mesurés sur le terrain sont non influencés par les précipitations. Ces jaugeages nous permettent donc de quantifier les apports des nappes phréatiques et, peut-être, de la fonte de neige, notamment pendant la période des étiages. La variabilité spatiale des débits sera liée, par conséquent, aux changements des caractéristiques physiques du

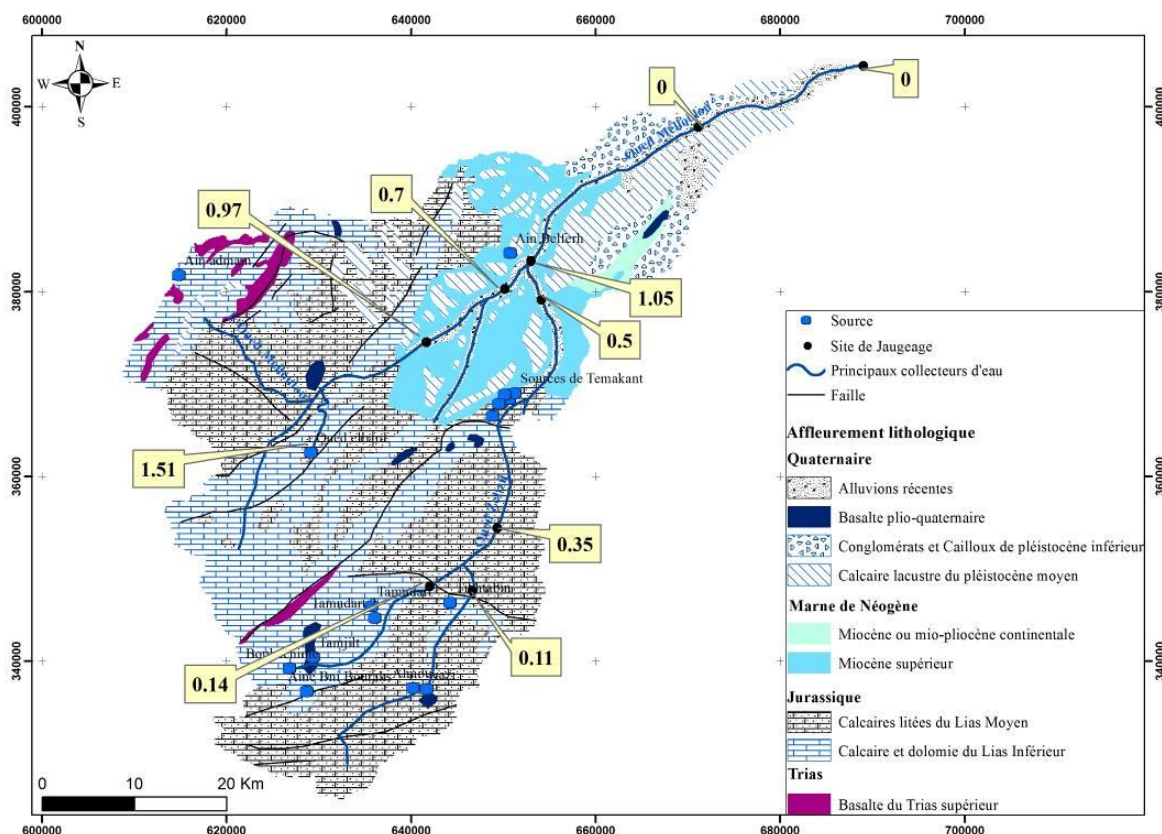
bassin versant et aux différents aménagements installés le long des cours d'eau de l'amont vers l'aval.

### 5.6.1 Evolution des débits amont-aval

Le bassin versant de l'Oued Melloulou est caractérisé par la diversification de ces caractéristiques physiques. En effet, la partie amont est caractérisée par des affleurements des sources et des résurgences qui alimentent les cours d'eau et assurent leurs pérennités. Paradoxalement, la partie aval de notre bassin est caractérisée par des activités agricoles irriguées intenses. Plusieurs points de prélèvements des eaux pour l'irrigation ont été installés. La perméabilité des roches est aussi élevée en amont plus qu'en aval. L'ensemble de ces caractéristiques particulières explique la diminution des débits d'étiage, de l'amont vers l'aval, jusqu'au point de confluence de l'Oued Melloulou avec l'Oued Zebzit (Fig 93 et 94). En revanche, les mesurés réalisés au niveau de l'Oued Zebzit montrent une augmentation des valeurs des débits de l'amont vers l'aval. En effet, la confluence de l'oued El Mansour avec Souf O Lout et le réseau de sources localisés le long du cours d'eau expliquent cette augmentation observée (Fig. 107 et 108)



**Figure 107 : Résultats des jaugeages pendant les hautes eaux (moyenne de 3 mesures ; Avril 2016 et Mars 2017 et 2018)**



**Figure 108 : Résultats des jaugeages pendant les basses eaux (moyenne de 3 mesures ; Septembre 2016, 2017 et 2018)**

### 5.6.2 Profils hydrologiques

La méthode d'élaboration du profil hydrologique et son interprétation ont fait l'objet de plusieurs travaux en hydrologie ; Corbonnois et al.,1991, Decloux et al., 1991, Sary, 1993, Obda et al., 2000 ... Elle nécessite la réalisation de campagnes de mesure des débits en différents points du cours d'eau et en différentes situations hydrologiques en basses et hautes eaux (Français et Sary., 1994). Ce profil est un outil graphique pour montrer l'évolution des débits amont-aval et met en évidence la diversité géographique du terrain (Sary, 1993 et Qadem, 2015).

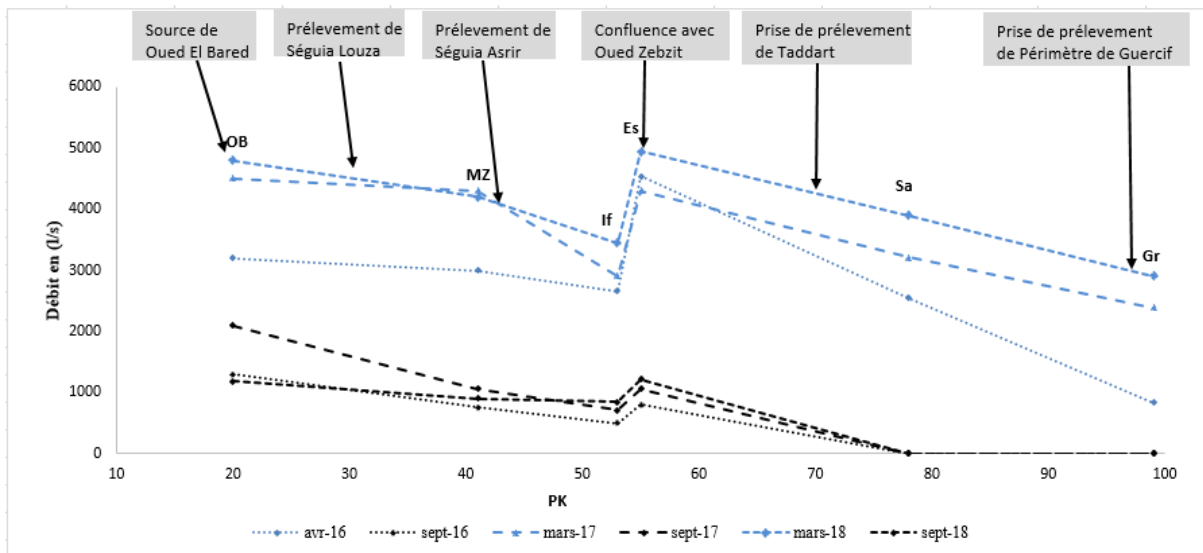
#### 5.6.2.1 Profils hydrologiques de l'Oued Melloulou

Les jaugeages des débits sur l'Oued Melloulou commence de la source de l'Oued El Bared, considérée la source la plus importante au niveau du bassin versant, avec un débit maximal de 4.8 m<sup>3</sup>/s mesuré en mars 2018. L'ensemble des tracés des débits mesurés entre 2016 et 2018 montrent une diminution de débits de ce point vers l'aval jusqu'à la confluence de l'Oued Melloulou et l'Oued Zebzit. Avec un débit maximal de 150 l/s et 200 l/s, le Séguia de douar Louza et de douar Asrir constitue les principaux prélèvements des eaux pour

l'irrigation avant le point de mesure suivant, situé proche de douar Amzaghrou (MZ). Ainsi, entre le point (OB) et (MZ), le cours d'eau traverse un substratum fortement perméable.

Après le site (MZ), comme le montre la figure 109 ; un certain nombre des prélèvements ont été installés pour l'irrigation de plusieurs zones agricoles. Le séguia le plus important est celui responsable de l'irrigation des parcelles agricoles de douar Lagnanda d'une superficie totale d'environ 90 hectares. Cela explique la diminution des valeurs de débit jusqu'à douar Ifrane (point de jaugeage numéro 7 (IF)). Ainsi, une propagation des terres agricoles irriguées par les pompages des eaux de l'Oued a été observée le long des cours d'eau ce qui presse également sur la variabilité des ressources en eau de l'amont vers l'aval.

A 200 m en aval de la confluence de L'Oued Melloulou avec l'Oued Zebzit, le profil hydrologique montre une forte augmentation du débit. Après ce point, les valeurs des débits affichent une diminution accélérée jusqu'à l'exutoire. Avant le point de jaugeage (Sa), avec d'autre séguias de débits différents, le canal de Taddart présente le principal prélèvement de l'eau avec un débit atteint 2 m<sup>3</sup>/s. Cette dernière influence fortement l'écoulement de l'Oued, notamment en période d'étiage. Il convient de noter qu'en période des basses eaux, on remarque souvent un assèchement total de l'Oued Melloulou à partir du point de mesure numéro 9 (Sa) jusqu'à l'exutoire. Cette situation provoque des conflits fréquentes entre les agriculteurs de l'amont et ceux de l'aval sur les partitions des droits à l'eau (Fig. 109 et 110).



**Figure 109 : Profils hydrologiques de l'Oued Melloulou**

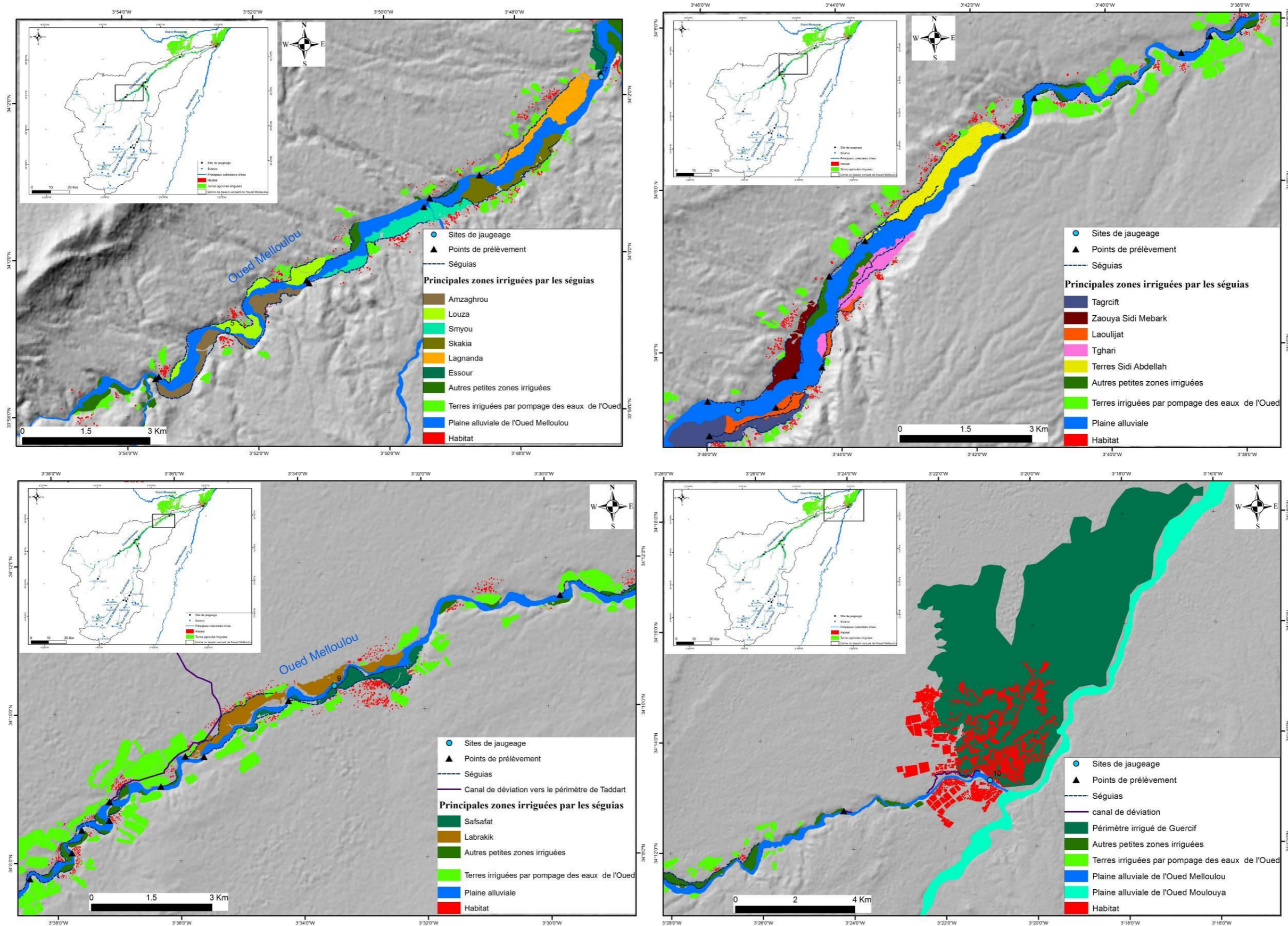


Figure 110 : Zones irriguées par les principaux séguias

### 5.6.2.2 Profils hydrologiques de l'Oued Zebzit

Les profils hydrologiques réalisés à base des mesures effectués sur le terrain au niveau de l'Oued Zebzit affichent une augmentation continue de débit de l'amont vers l'aval. Ainsi, ce cours d'eau est caractérisé par un réseau de sources qui ressurgissent le long de l'oued ce qui assure sa pérennité et augmente son débit. Malgré les terres agricoles alimentées par les apports de ce cours d'eau, notamment dans la partie aval. Leur superficie reste réduite par rapport à celles irriguées par les eaux de Melloulou. La spatialisation des débits Spécifique calculés à base des débits jaugés

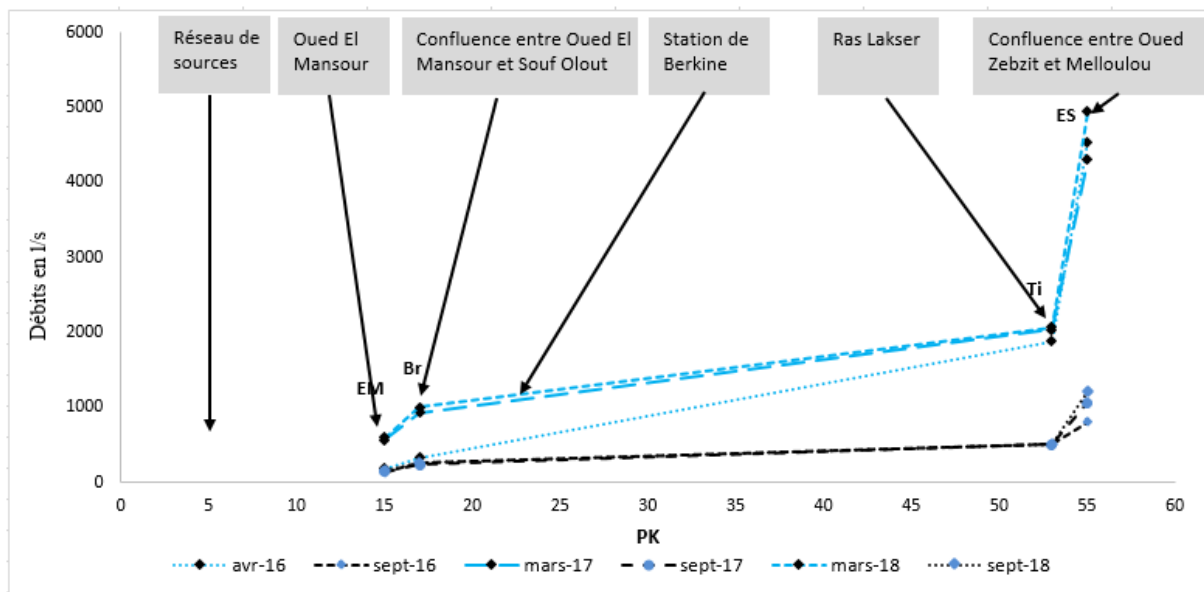


Figure 111 : Profils hydrologiques de l'Oued Zebzit

### 5.6.3 Rendements hydrologiques des Sous bassins versants

Comme nous avons précédé, les campagnes de Jaugeages ont été effectuées en Avril 2016, et Mars de 2017 et 2018 et en septembre des mêmes années. Ces dates présentent les périodes des hautes et des basses eaux respectivement. La spatialisation des rendements des sous bassins versants a été réalisée en calculant les débits spécifiques en  $l/s/km^2$  à partir des débits jaugés et la superficie contrôlée par chaque sous bassin. Les résultats obtenus révèlent que la partie ouest du haut Melloulou, est la plus rentable en matière des ressources en eaux par rapport à la partie sud et sud-est. En dépit de l'existence d'un réseau de sources au niveau de la dernière partie. La contribution de la source de l'Oued El Bared, située en amont du Melloulou, dans l'écoulement pérenne du cours d'eau principal est d'environ  $4.8 m^3/s$  pendant la période des hautes eaux et  $1.3 m^3/s$  en basses eaux. Elle

augmente par conséquent le rendement de partie ouest. Cette source est la plus grande dans la zone d'étude (Fig. 113).

Pendant la période des hautes eaux, les rendements des sous bassins oscillent entre 1 et 4.6 l/s/km<sup>2</sup> et entre 0 et 1 l/s/km<sup>2</sup> en période des basses eaux. Les débits spécifiques diminuent de l'amont vers l'aval avec l'augmentation de la superficie des sous bassins contrôlés et de l'expansion des prélèvements pour l'irrigation le long du talweg du Melloulou (Fig. 112).

#### **5.6.4 Débits des principales sources situées dans le bassin**

Grâce à leur système karstique très fissuré, alimenté principalement par les précipitations nivales, les montagnes du Moyen Atlas Nord Oriental constituent un grand réservoir hydrogéologique qui stocke des ressources en eau importantes. Ces eaux souterraines resurgissent à la surface sous forme d'un réseau de sources qui assurent le débit de base de l'Oued Melloulou et de ces affluents. Les principales sources jaugées dans la zone sont :

- La source de l'Oued El Bared, dont les débits varient entre 1.3 m<sup>3</sup>/s en période d'étiage et plus de 4.8 m<sup>3</sup>/s pendant les hautes eaux. Cette source est située dans le Haut de Melloulou en aval du lac de Tameda.
- Les sources de Yazzi, Tamendart et Tekhtabine ayant un module annuel de 200, 360 et 150 l/s, ainsi qu'un ensemble de petites résurgences avec un débit dépassant guère 100l/s. Ces sources, situées en amont de l'Oued Zebzit, assurent la pérennité de l'écoulement des affluents et contribuent dans l'irrigation d'un certain nombre de parcelles agricoles installées sur place.



**Photo 11 : Oued Melloulou à environ 100m en aval de la source de l'Oued El Bared ; le 21/07/2017**



**Photo 12 : Source de l'Oued El Bared (21/07/2017)**

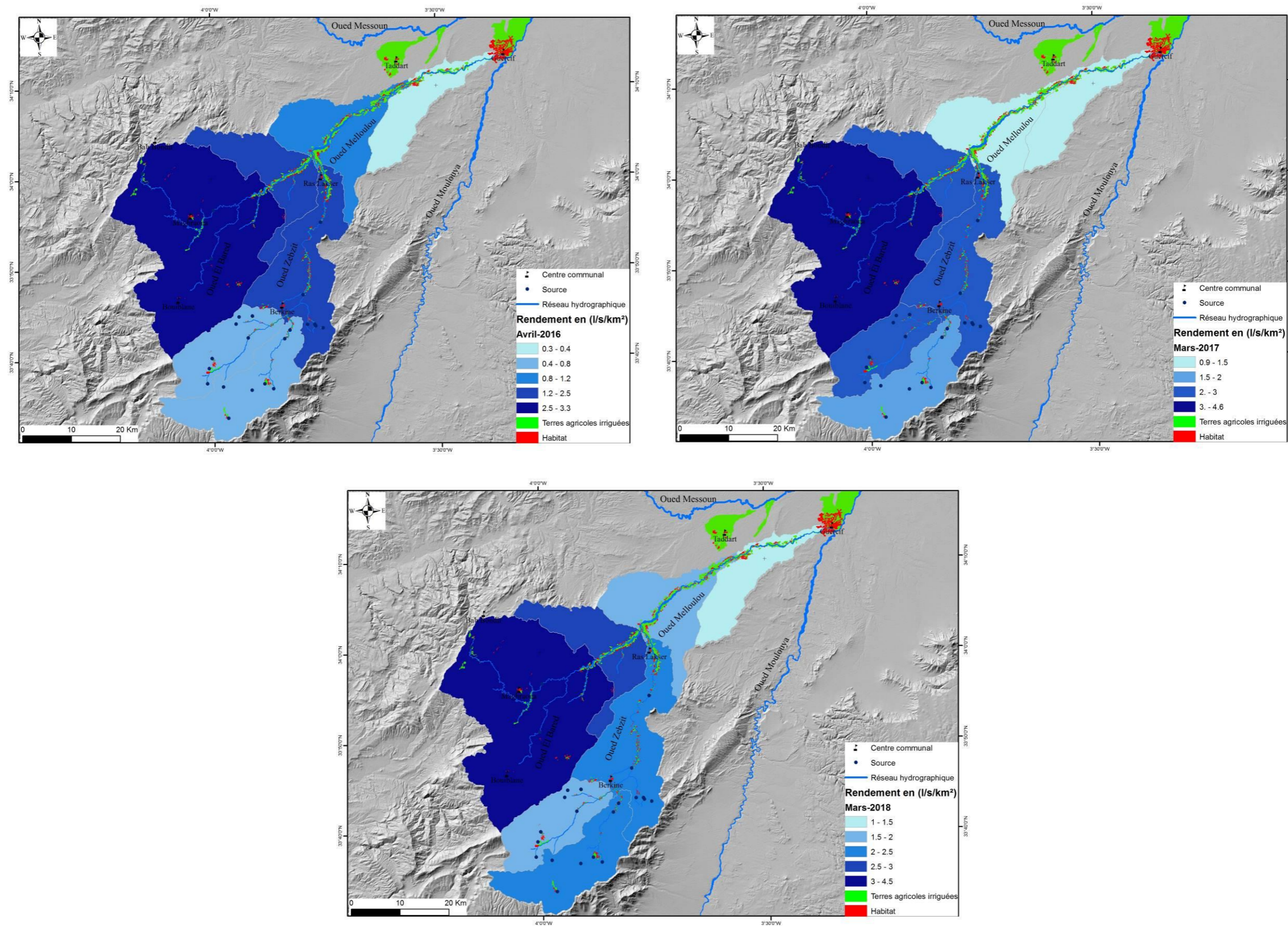


Figure 112 : Cartes des rendements hydrologiques pour la période des hautes eaux

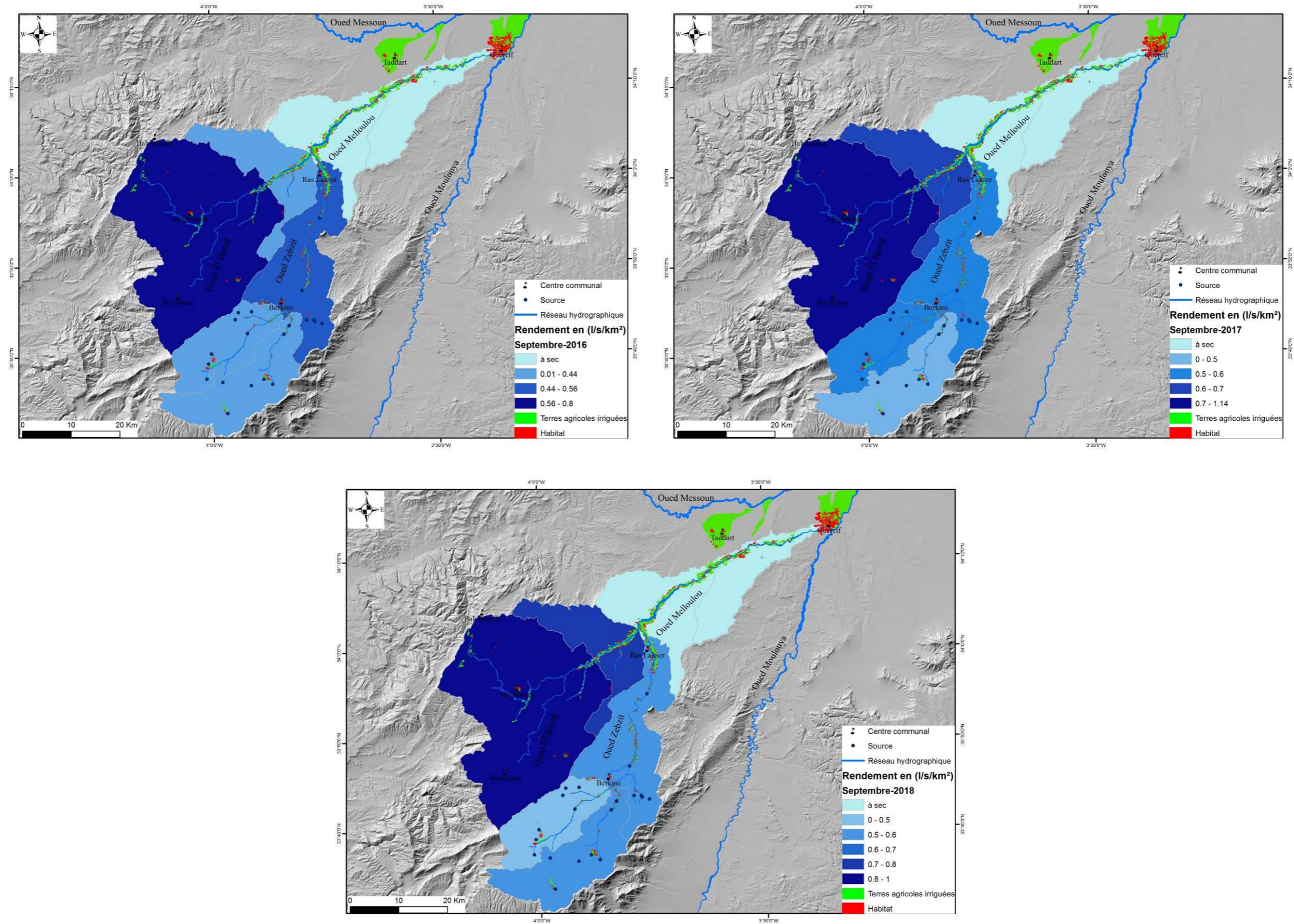


Figure 113 : Cartes des rendements hydrologiques pour la période des basses eaux

## 6 Lac de Tameda : un barrage naturel alimentant le réservoir hydrogéologique

Le lac de Tameda est un plan d'eau unique dans la zone d'étude. Il est considéré comme un barrage naturel fermé grâce à un éboulement catastrophique, occasionné par un évènement sismique, qui a barré la vallée encaissée d'un petit affluent de l'Oued Tmorghot, appelé Souf Ighrane (El Fellah, 1994). Il s'installe sur une altitude d'environ 1800m. Ce lac collecte les eaux d'un bassin versant de 77 km<sup>2</sup>. Il chevauche sur la zone la plus fracturée du Moyen Atlas plissé (Sabaoui et al., 1987) (Fig. 114). La fissuration et la karstification du substratum provoque la vidange totale et rapide du lac vers la fin du mois de mai et début de juin. Le remplissage de ce plan d'eau se fait par les précipitations tombées sur les sommets montagneux et par les apports de la fonte de neige entre novembre et avril.

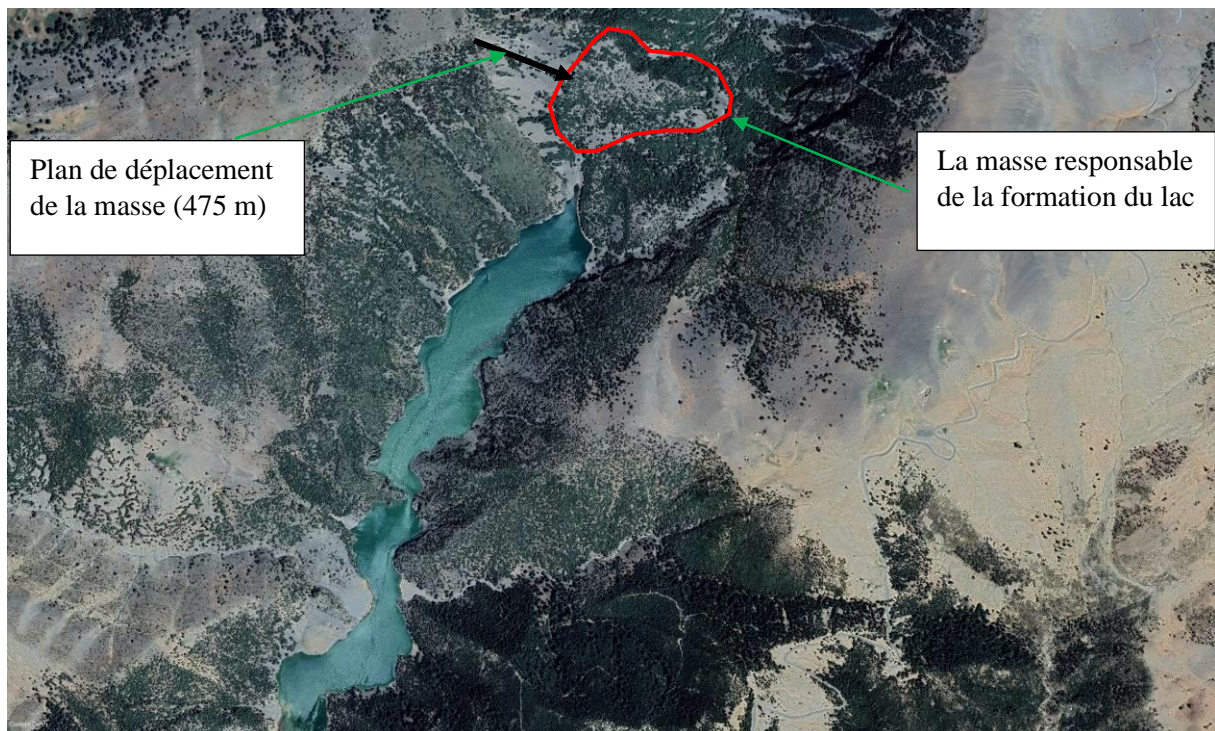


Figure 114 : Lac de Tameda

### 6.1 Bathymétrie du lac

La bathymétrie est un ensemble de mesures de profondeur d'un plan d'eau qui nous permet de visualiser la topographie du fond de ce plan (Pujo, 1995). Les résultats obtenus de ces mesures s'illustrent sous forme d'une carte de courbes de niveaux ou d'un raster classifié en tranches de profondeur, dont chaque pixel de l'image matricielle caractérise une profondeur selon une teinte de couleur.

Vus l'absence d'un échosondeur analogique qui permet de mesurer le profil de la profondeur le long de transects linéaires, nous avons utilisé la technique traditionnelle manuelle. Cette dernière est basée sur une corde collée avec un décimètre. L'outil utilisé pour rejoindre le lac est le canot pneumatique (Photo. 14).



**Photo 13 : Assèchement totale du lac ;  
le 25/06/2018**



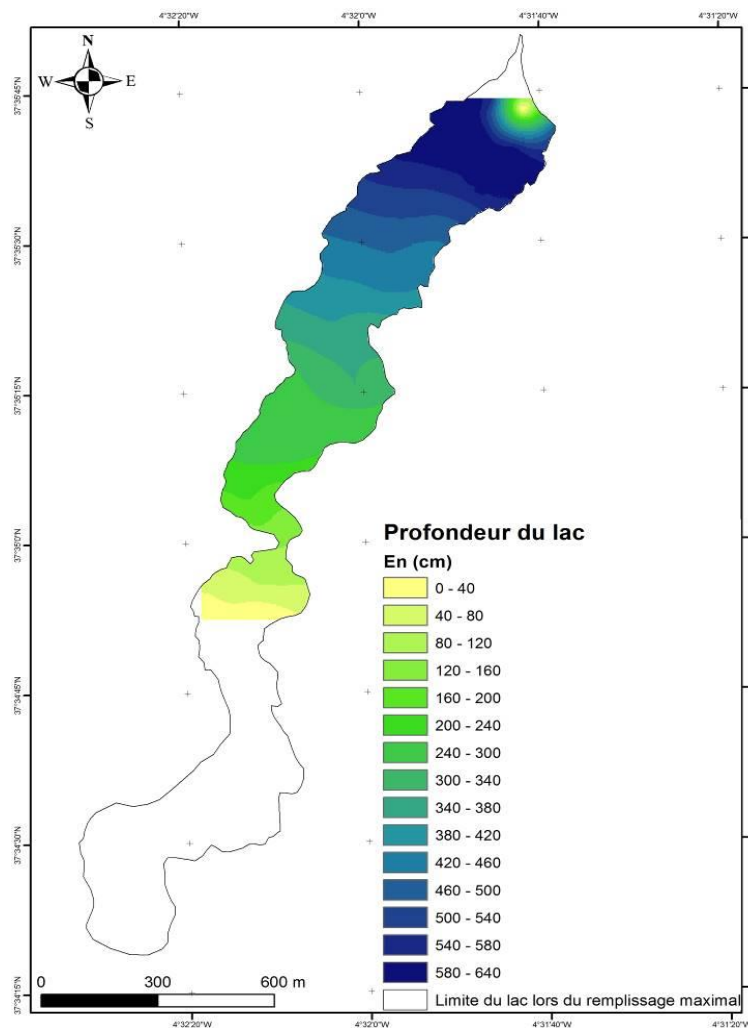
**Photo 14 : Canot pneumatique utilisé pour la  
bathymétrie et l'exploration du lac de Tameda**

## **6.2 Résultats de bathymétrie**

Entre 28 et 30 avril 2017, nous avons réalisé 49 mesures de profondeur. Ce nombre de prélèvements présente une couverture acceptable du lac de Tameda vu sa petite superficie (Fig. 115).

Les données enregistrées ont été spatialisées en utilisant le logiciel Arc Gis pour avoir une carte bathymétrique ou carte des isobathes (Fig. 115).

Les résultats obtenus montrent d'une manière générale que le fond de ce lac est plus ou moins plat, ne présentant aucune ondulation. Ainsi, la profondeur augmente du Sud-ouest vers le nord-est ce qui signifie une chute de pente vers le nord-est. La profondeur moyenne estimée en avril 2017 est de 292 cm, soit 2.92 m, avec un maximum de 6.35 m. Cependant, la surface du plan d'eau calculée est d'environ 388018 m<sup>2</sup>. Ce résultat nous permet par conséquent de calculer facilement le volume d'eau stocké dans le lac à cette date, étant donné que les berges sont sub-verticales. Le volume est alors de 1.13 million de m<sup>3</sup>.



**Figure 115 : Carte bathymétrique du lac de Tameda réalisées à partir des données de terrain (mesures de 28 à 30 avril 2017).**

Nous avons également réalisé deux sorties de terrain lors du tarissement total du lac. Ces sorties ont été effectuées le 25/07/2017 et le 19/06/2018. L'assèchement du plan d'eau nous permet de suivre les traces de l'eau sur les berges et de mesurer par la suite les hauteurs maximales atteintes durant les périodes de remplissage maximal par rapport au fond du lac au niveau de 84 points (Fig. 116).

La carte bathymétrique a été établie en utilisant la spatialisation de ces profondeurs via le logiciel Arc Gis.

Pendant son remplissage maximal, le plan d'eau couvre une superficie de 599540 m<sup>2</sup> avec une profondeur moyenne d'environ 3 m. Le volume maximal d'eau stocké dans le lac est donc de 1.8 million de m<sup>3</sup>. La profondeur maximale est de 7.7 m au niveau de l'entonnoir.



Photo 15 : Mesure de la hauteur de l'eau du lac lors de son remplissage maximal (25/06/2018)

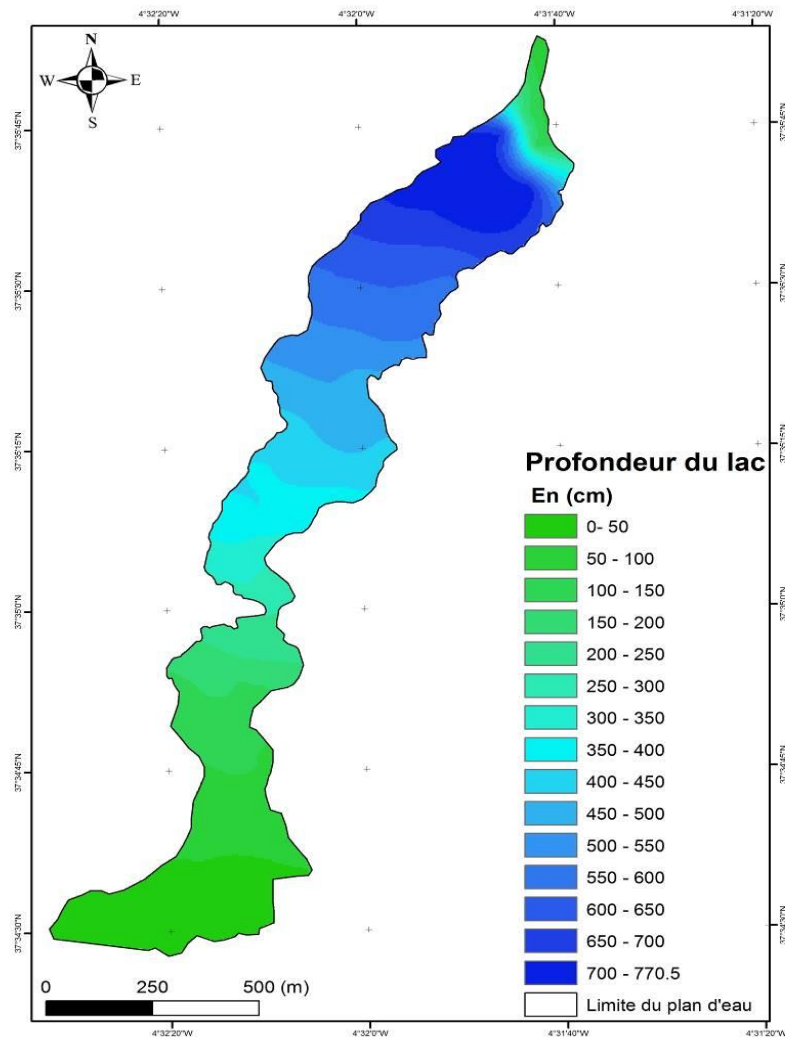


Figure 116 : Carte bathymétrique du lac de Tameda réalisées à partir des données de terrain (mesures de 25/07/2017 et de 19/06/2018).

### **Conclusion du chapitre**

Quoique les séries hydrométriques dont on dispose sont plus ou moins courtes par rapport à celles des précipitations, l'analyse statistique de ces dernières aborde quelques aspects d'une variabilité concordante avec celles de la pluviométrie. En effet, la variabilité interannuelle des modules hydrologiques est très forte avec un coefficient de variation proche de 1. Ainsi, des fluctuations importantes, d'une année à une autre, ont été observées avec une proportion élevée des années déficitaires, notamment avant les années 2000. Les tendances des modules interannuels sont généralement positives sans qu'elles soient significatives.

Les trois quarts de la lame d'eau tombée ne s'écoulent pas vu la forte demande climatique "ETP" qui dépasse largement les précipitations et à cause de la perméabilité élevée d'une couverture lithologique engendrant un écoulement souterrain important.

Les résultats de l'analyse des phases hydrologiques extrêmes montrent que 70% des crues ont été enregistrées en automne, avec un coefficient de variation dépassent 100%. La puissance des crues observées est fortement élevée selon les résultats issus de l'indice de Pardé. La tendance des séries des Qjmax est strictement positive et statistiquement plus significative en aval qu'en amont. L'estimation des débits de crues via le model racine Gumbel montre des crues puissantes.

Malgré l'existence d'un réseau dense de sources en amont et la présence du lac de Tameda, qui joue un rôle déterminant dans l'alimentation d'écoulement souterrain, les débits d'étiage au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou sont très faibles et de haute fréquence, surtout en aval où l'Oued s'assèche presque 5 mois successifs. Cet assèchement se manifeste principalement en été et en automne, ce qui contribue dans l'apparition des conflits autour de l'eau entre la population de l'amont et celle de l'aval.

En utilisant la méthode d'exploration des champs de vitesse, les résultats de jaugeage réalisés sur le terrain montrent deux différents aspects : le premier présente une diminution de débit de l'amont vers l'aval au niveau de l'Oued Melloulou et le seconde affiche une augmentation de ce paramètre au niveau de l'Oued Zebzit. Le haussement de débit est lié directement à l'alimentation par les sources qui se répartissent le long du cours d'eau malgré la forte perméabilité de la partie amont du bassin, tandis que le rôle des conditions

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

climatiques et des prélèvements est très remarquable dans l'atténuation de débit d'écoulement, notamment en aval.

Le prochain chapitre sera focalisé sur l'évolution de l'occupation du sol au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou et son impact sur le fonctionnement hydrologique des cours d'eau.

## CHAPITRE IV :

### EVOLUTION D'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SON IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE

---

#### Sommaire

---

Introduction du chapitre.....	212
1 Exploitation des eaux dans le bassin versant de l'Oued Melloulou .....	212
2 Périmètre irrigué de Taddart ; une zone agricole basée sur les apports de l'Oued.....	223
3 Périmètre irrigué de Guercif, une zone agricole par excellence .....	226
4 Superficie des terres irriguées par les eaux souterraines .....	229
5 Gestion de l'eau agricole .....	232
6 Facteurs expliquant l'extension des terres agricoles .....	235
7 Dynamique des terrasses agricoles sur les terrasses fluviales.....	236
Conclusion du chapitre.....	240

## **Introduction du chapitre**

Depuis toujours, la relation entre l'homme et l'eau est caractérisée par une influence mutuelle. Ainsi, les activités exercées sur le milieu naturel traduisent cette relation. Ce chapitre vise l'analyse des impacts anthropiques sur les ressources en eau dans le bassin versant, et particulièrement sur le comportement hydrologique de l'Oued Melloulou.

Ce bassin chevauche, dans sa majeure partie, sur une zone rurale, dont l'agriculture en irriguer présente l'activité économique principale de la population locale. Par conséquent, les apports hydriques de ses cours d'eau ont été destinés surtout pour l'irrigation des terres agricoles. A l'intérieur du bassin, les parcelles cultivées se concentrent le long des cours d'eau ou à proximité des sources.

Aujourd'hui, la superficie totale de ces parcelles est d'environ 4000 ha. Ainsi, en aval, deux petits périmètres irrigués, situant hors bassin, profitent des ressources en eaux de l'Oued Melloulou pour l'irrigation. Il s'agit du périmètre irrigué de Taddart et de Guercif avec une surface totale d'environ 8000 hectares. Ces prélèvements auront, donc, sans doute une influence remarquable sur le fonctionnement d'écoulement de l'oued Melloulou.

Afin de visualiser la forte pression sur les ressources hydriques à travers l'irrigation et la dynamique des terrasses agricoles dans le bassin, trois approches ont été adoptées :

1. Approche cartographique : cette dernière met en lumière l'évolution des superficies agricoles irriguées en fonction du temps à travers des cartes d'occupation du sol. Cette étape est basée sur les images satellitaires « Google Earth » de 2000 et 2018, des images Landsat ETM+ et OLI/TIRS et de différentes mesures et prélèvement par GPS.
2. Des observations issues des enquêtes selon un questionnaire destiné pour ce but (voir annexe).

### **1 Exploitation des eaux dans le bassin versant de l'Oued Melloulou**

Comme il a été cité dans l'introduction de ce chapitre, les apports hydriques de l'Oued Melloulou sont utilisés principalement dans le domaine de l'irrigation. Cependant, le degré de la pression sur les ressources en eau varie de l'amont vers l'aval.

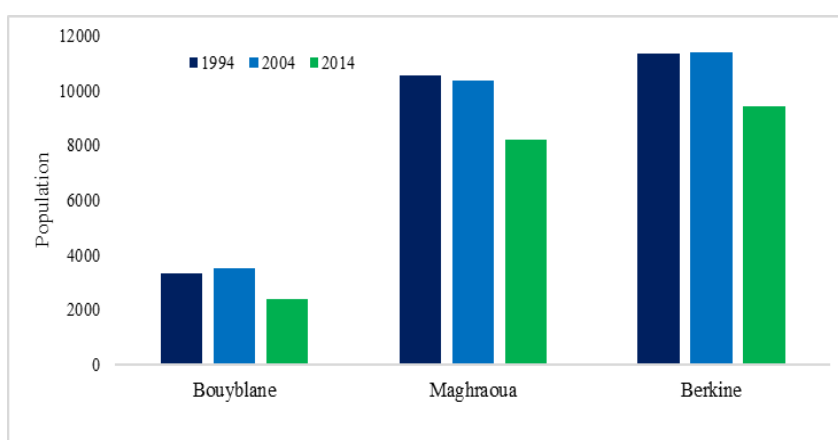
### 1.1 Exploitation peu importante en amont

Les sommets montagneux situés en amont du bassin versant reçoivent une lame d'eau précipitée annuelle importante, dépassant sur quelques versants les 800 mm. Aussi bien, cette partie du bassin reçoit chaque année des précipitations neigeuses avantageuses. Elles oscillent entre 550 cm /ans sur les sommets de Bouiblanc et 30 cm/ans au niveau du centre communal de Maghraoua (Ben Brahim, 2009).

En revanche, la partie amont du bassin est composée d'une lithologie fortement perméable. Cette caractéristique permet d'avoir un réservoir de stockage souterrain avantageux. C'est pourquoi un réseau de sources et de résurgences affleure à la surface et garantit la pérennité de l'écoulement dans les cours d'eau de Melloulou. On peut conclure alors, que la partie amont est considérée comme une zone de production des ressources en eau par excellence.

Ainsi, selon les résultats des recensements réalisés au Maroc en 1994, 2004 et 2014, les communes chevauchant sur la partie amont du bassin se caractérisent par une densité de population très faible. En 2004, cette dernière est estimée à 22 hab/ Km<sup>2</sup> à Maghraoua, 17 hab/ Km<sup>2</sup> à Bouiblanc et 14 hab/ Km<sup>2</sup> à Berkine. Cependant, une diminution de ces valeurs a été observée en 2014 de 21, 32 et 17% respectivement au niveau des communes précitées (Fig.117).

Les travaux d'enquête sur le terrain montrent que l'exode rural est le facteur explicatif de cette régression chez nombreux d'habitants. En effet, les conditions climatiques difficiles, le recul de l'élevage et de la transhumance, l'absence totale des sources de revenu et d'infrastructures publiques sont considérées comme les principaux facteurs responsables de l'exode rural.



**Figure 117 : Évolution de la population au niveau des communes rurales de l'amont du bassin entre 1994 et 2014**

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

La partie amont du bassin de Melloulou est caractérisé par une topographie accidentée, par une lithologie fortement perméable, par des pentes fortes et par un couvert forestier assez important. Ces caractéristiques physiques offrent peu d'opportunités pour une agriculture irriguée. En revanche, la céréaliculture en Bour et l'élevage sont les activités économiques les plus répandues. Cependant, l'agriculture en irriguée est observée seulement sous forme de petites parcelles dispersées en aval des sources et sur les petites terrasses fluviales des affluents (Fig. 118). Elle présente moins de 20 % de la superficie agricole totale du bassin versant. Les travaux de terrain montrent que la surface des parcelles oscille autour de 0.1 ha. Au niveau de cette partie, l'irrigation des terres agricoles en amont est effectuée généralement par les apports hydriques des sources. Les canaux de transfert de l'eau sont des petits Seguias en terre ou rarement en bois (photo. 16 et 17). Les débits transférés sont, par conséquent, très faibles, ne dépassant pas les 10 l/s.

Avant chaque opération d'irrigation, les ressources en eau transférées sont captées premièrement dans des bassins de stockage appelés localement « **Tijent** » (Photo. 18). Ces bassins sont planchés en béton.

Chaque communauté agricole est constituée d'une grande famille ou d'une fraction homogène. Cette caractéristique facilite la gestion des droits à l'eau entre les agriculteurs. Ces droits ont été réglés par des lois coutumières orales héritées et non discutables. Ces coutumes sont le résultat d'un ensemble de conventions qui traduisent un certain équilibre social dans la tribu.



**Photo 16 : Petit séguia en bois utilisé pour l'irrigation**



**Photo17 : Séguia en terre**



**Photo 18 : Bassin de stockage (Tijent)**

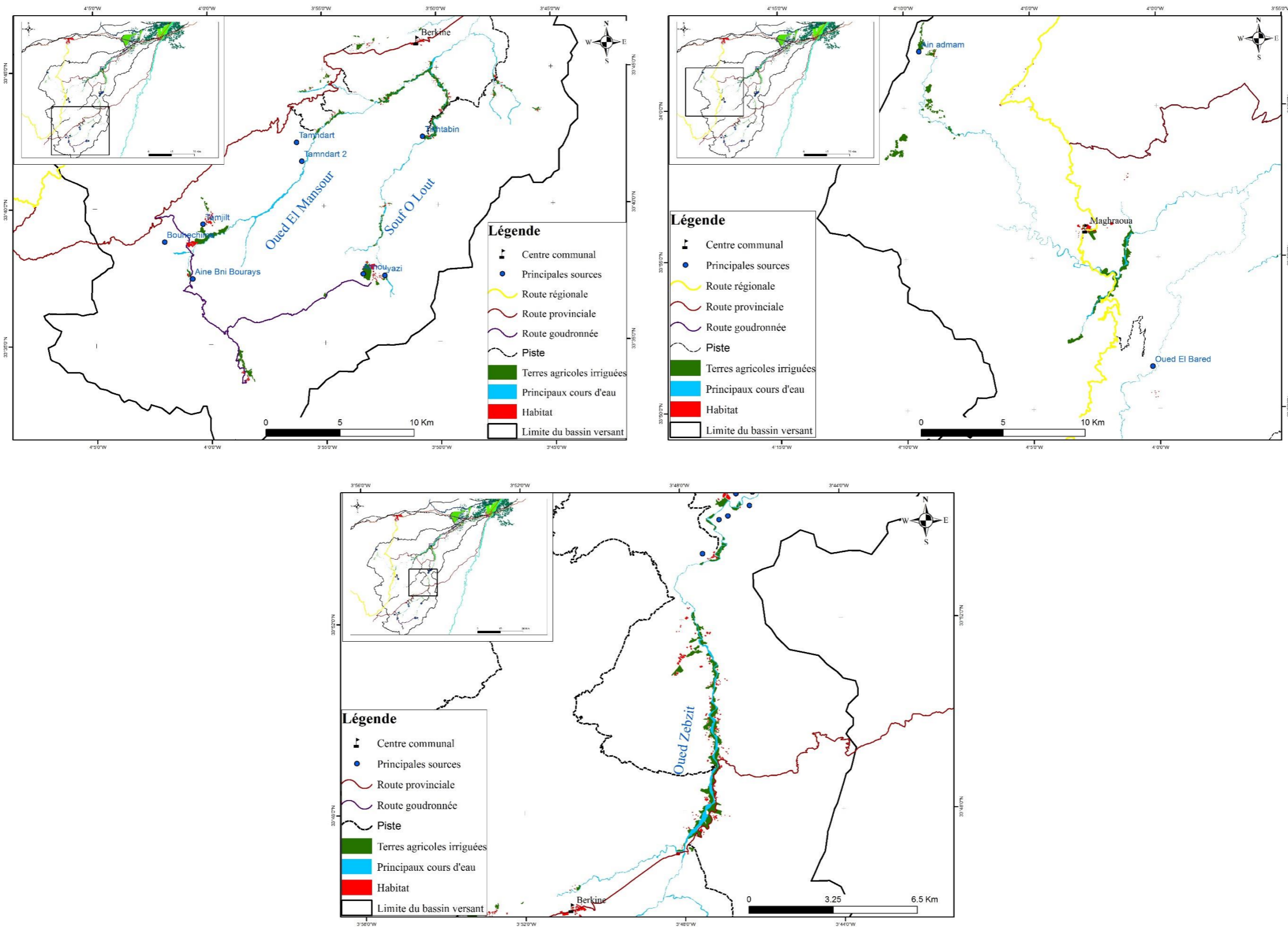


Figure 118 : Répartition des terres agricoles en montagnes du bassin

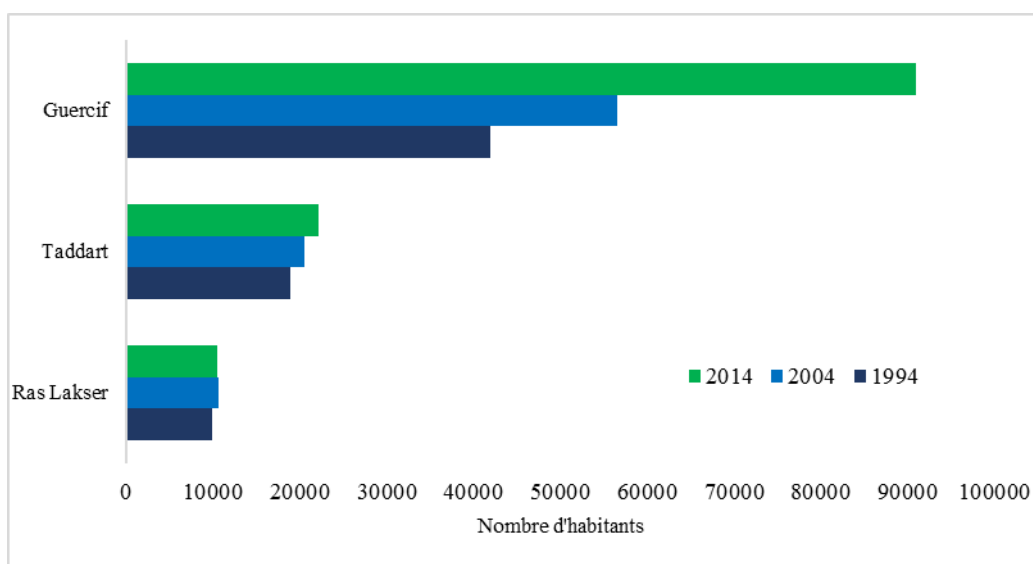
## 1.2 Exploitation intensive des ressources en eau en aval

En l'aval, les terrasses fluviales comportent, depuis longtemps, des terres agricoles installées le long du cours d'eau principal. La topographie plus ou moins plate, les sols profonds et fertiles, et l'abondance des ressources en eau constituent des bonnes opportunités pour une agriculture en irriguer au niveau de cette partie du bassin. La superficie totale de ces parcelles irriguées est estimée à environ 2200 ha, soit 80% de la superficie totale des terrasses agricoles profitant des apports hydriques de l'Oued Melloulou et de ses affluents pour l'irrigation.

En dépit de leurs situations à l'extérieur du bassin versant, les deux périmètres irrigués de Guercif et de Taddart sont également irrigués par les eaux de l'Oued Melloulou.

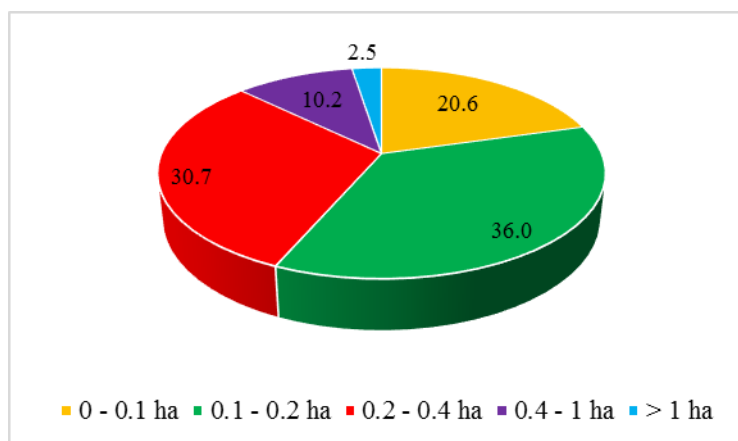
Ainsi, d'après les résultats de l'enquête de terrain, les communes situées en aval constituent des zones d'attraction et de réception des flux de l'exode rural venant de l'amont du bassin. De ce fait, une évolution élevée dans le nombre d'habitants a été enregistré entre 1994 et 2014

Selon les données de recensements de 2004 et 2014, cette augmentation observée, surtout au niveau des communes de Taddart et de Guercif, est estimée à 38 et 10% respectivement. La consommation et la demande en eau augmentent alors en parallèle (Fig. 119).



**Figure 119 : Évolution de la population au niveau des communes rurales chevauchant sur la partie aval du bassin entre 1994 et 2014**

Le diagramme ci-dessous affiche la distribution des superficies des parcelles agricoles sur les terrasses fluviales en aval du bassin. En effet, les travaux de terrain, enquêtes et interviews, montrent que 79.4 % des parcelles ont une



**Figure 120 : Tranches de superficie des parcelles agricoles irriguées en amont**

superficie supérieure à 0.1 ha, dont 44 % de ces dernières sont supérieurs à 0.2 ha.

La mobilisation des eaux vers les terres irriguées s'effectue de très loin, en amont des parcelles à irriguer. Cette opération fait par les « Seguia » ou localement appelée « Targua ». Il s'agit d'un canal de déviation de l'eau par gravité, revêtus en béton armé ou en terre. A l'époque, la construction des séguias nécessite une bonne connaissance de la topographie du terrain de manière à respecter un certain degré de pente qui ne soit ni faible ni élevé.

Pour satisfaire les besoins des agriculteurs, les débits captés par ces « Seguias » sont généralement hauts ; ils varient de 40 l/s à 300 l/s selon les dimensions de ces dernières et de la superficie agricole alimentée, en plus des variations des débits dans le cours d'eau.

Chaque « Séguia » principal alimente un petit périmètre irrigué en eau qui appartient à un groupe spécifique d'utilisateurs. Un ensemble de branches de distribution appelés les « Mesref », liés à un « Seguia » principal fournissent l'alimentation à un groupe de parcelles réunies en un petit périmètre qui appartient à une fraction donnée, (Fig 121).

Généralement, les déviations des ressources en eau se font selon des seuils traditionnels appelés «Essed » ou « Ouggouy ». Cet ouvrage simple est construit en matériaux trouvés sur place, les tiges des arbres, les amas de pierre et les sacs de sables. L'ensemble se colmate par les argiles (photo 20). La fragilité de ces édifices nécessite leur reconstruction après chaque crue.

Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique



Photo 19 : Basses terrasses agricoles irriguées pas les Séguias



Photo 20 : Exemple de barrage traditionnel (Ouggou) utilisé pour le transfert de l'eau de l'Oued vers les Séguias

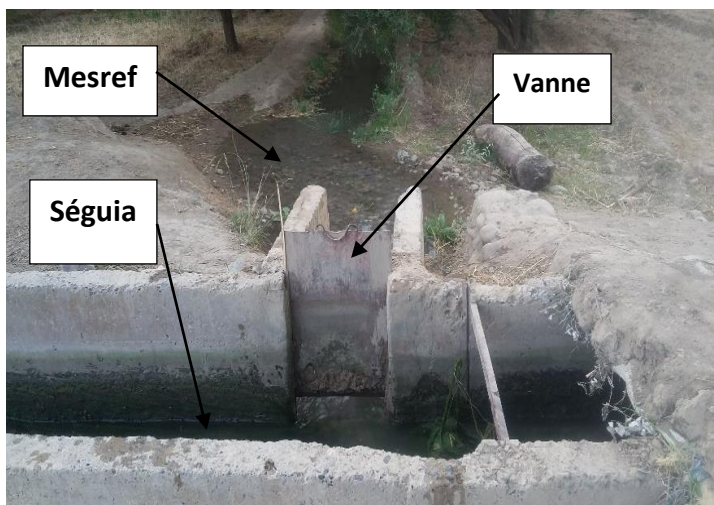


Photo 21 : Séguia en béton en plus d'un Mesref et d'une vanne



Photo 22 : Exemple de Séguia en béton armé

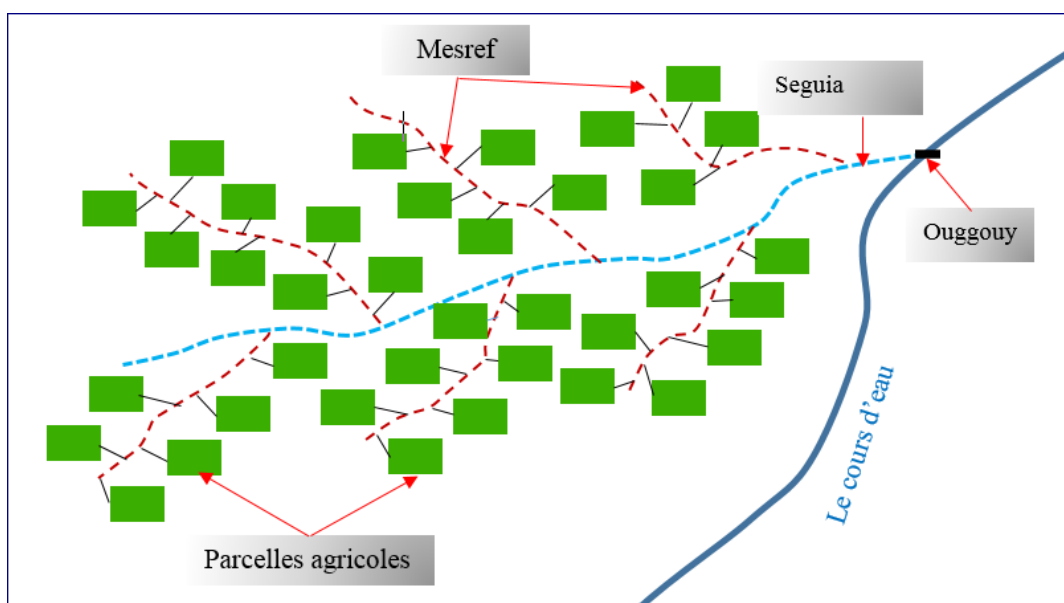
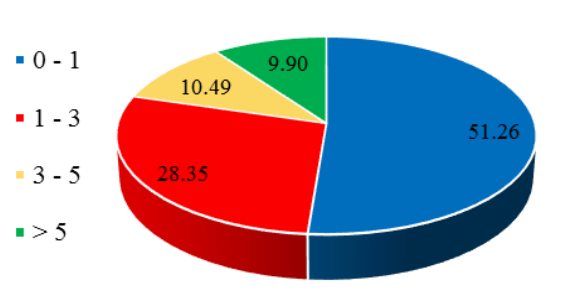


Figure 121 : Schéma explicatif du transfert de l'eau de l'Oued jusqu'à la parcelle

Dans le but de suivre l'évolution des terres agricoles en fonction du temps au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, et particulièrement en aval, les imageries satellitaires « Google-Earth » de 2000 et de 2018 ont été utilisées. Ainsi, nous avons validé les résultats obtenus par les images satellitaires « Landsat » et les prospections sur le terrain.

Les résultats issus de l'analyse des images satellitaires utilisées, dans cette étude, montrent une importante évolution des superficies agricoles irriguées par les eaux de l'oued dans la totalité du bassin versant. La surface créée entre 2000 et 2018 dépasse 1100 ha. En effet, et compte tenu qu'il n'y a pas encore d'espaces vides sur les basses terrasses, cet élargissement a été observé sur les hautes terrasses villafranchiennes (Fig. 122 et 123).

Les surfaces de ces nouvelles exploitations agricoles sur les hautes terrasses sont importantes par rapport aux parcelles sur des basses terrasses. En effet, presque 50% des exploitations observées ont une superficie supérieure à 1 ha, dont 20% dépassent les 3 ha et 28.35% situées entre 1 et 3 ha (Fig. 124).



**Figure 124 : Tranches des superficies des terrasses agricoles en aval**

En revanche, pour les anciennes terrasses, seulement 2 % des parcelles ont une surface dépassant 1 ha. Il convient de noter que ces exploitations ont été bien aménagées.

À cause du grand dénivelé d'altitude entre le chenal et les hautes terrasses, l'irrigation de ces nouvelles terres par les Seguia devient impossible. C'est la raison pour laquelle les propriétaires utilisent les techniques de pompage des eaux directement de l'Oued vers l'exploitation en utilisant l'énergie solaire ou parfois par le Gaz du butane.

En 2018 nous avons compté plus de 100 pompes réparties le long de l'Oued. Cette évolution en nombre de pompes exerce une pression importante sur les apports des cours d'eau et augmente la demande en eau, notamment en période d'étiage. D'un point de vue législatif, les terres ont été créées d'une façon illégale, sans autorisation.

Les travaux réalisés sur le terrain au niveau des terrasses fluviatiles montrent que l'irrigation est effectuée en moyenne une fois par semaine. L'irrigation d'une parcelle de 1 ha nécessite une quantité d'eau d'environ 440m<sup>3</sup>.

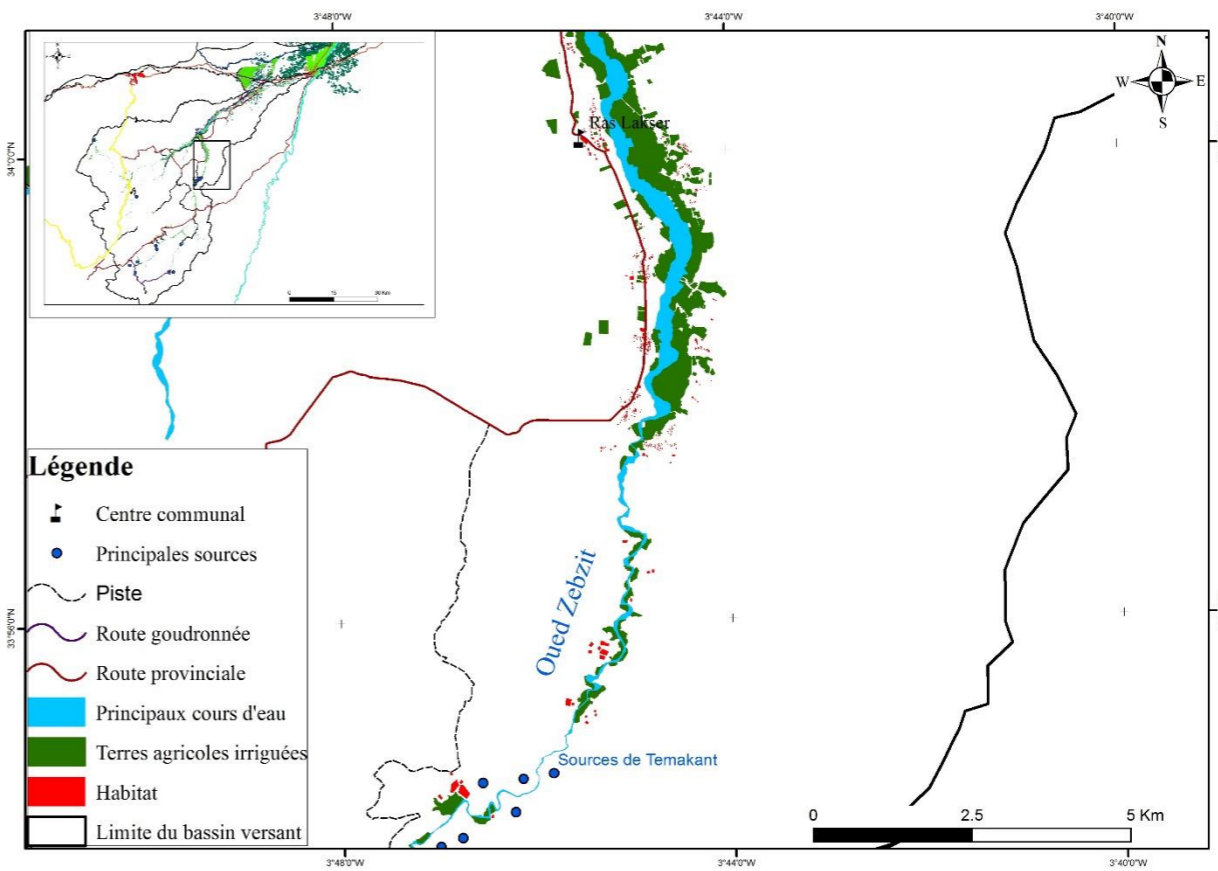
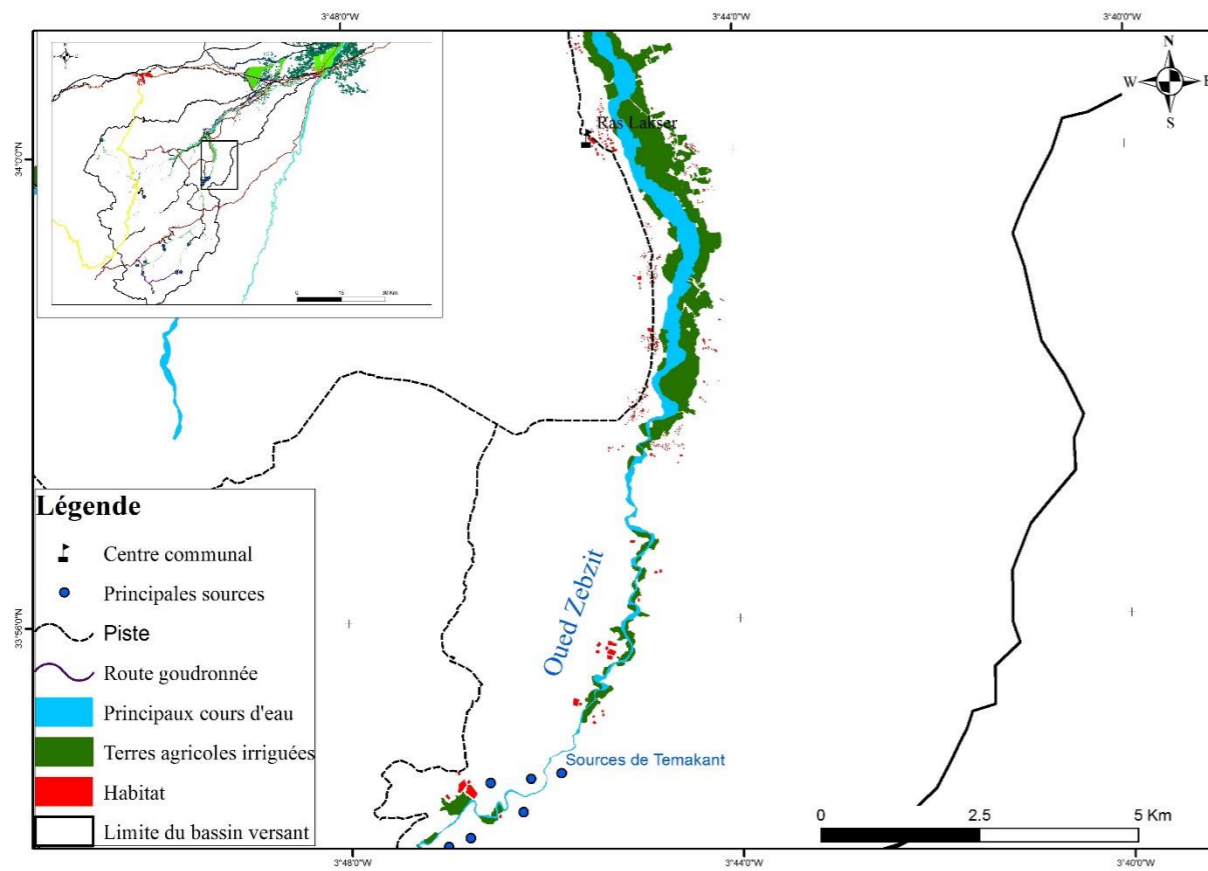
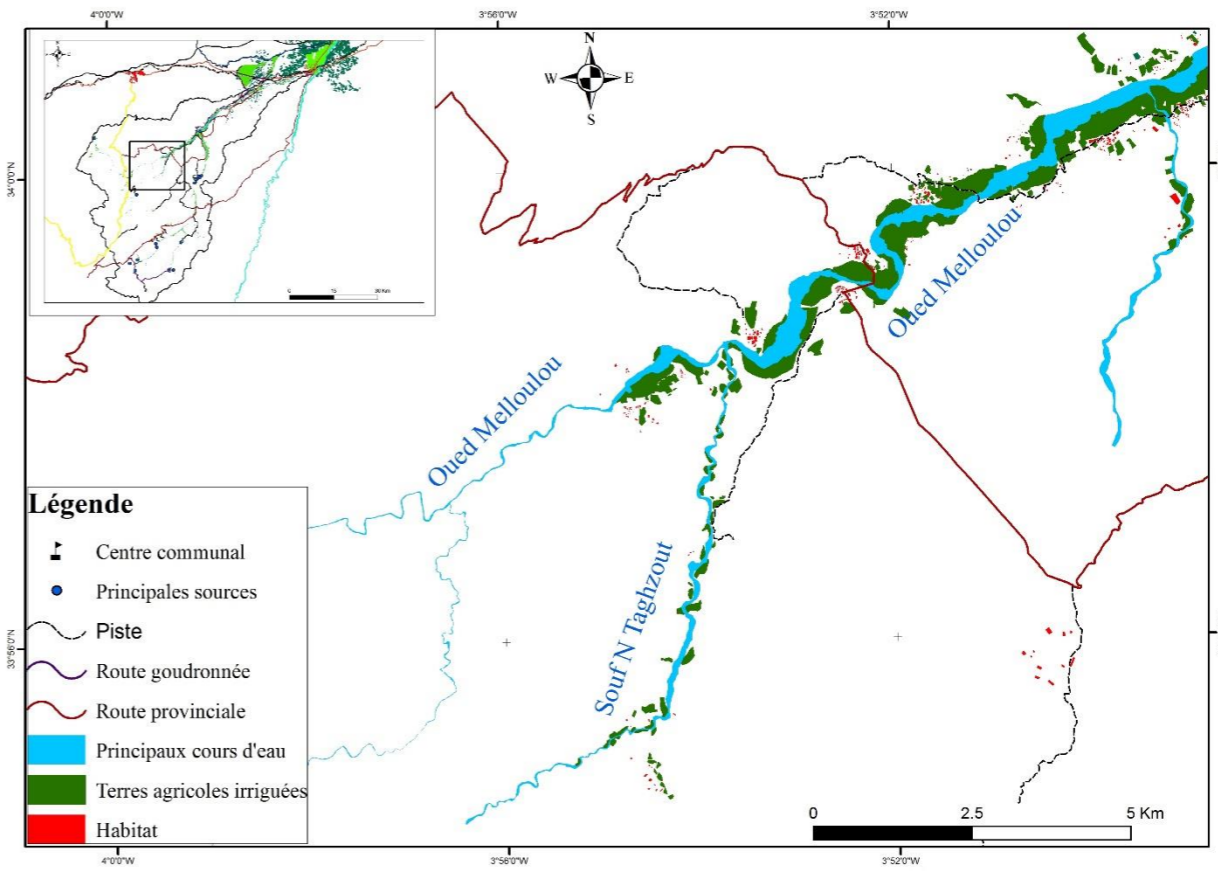
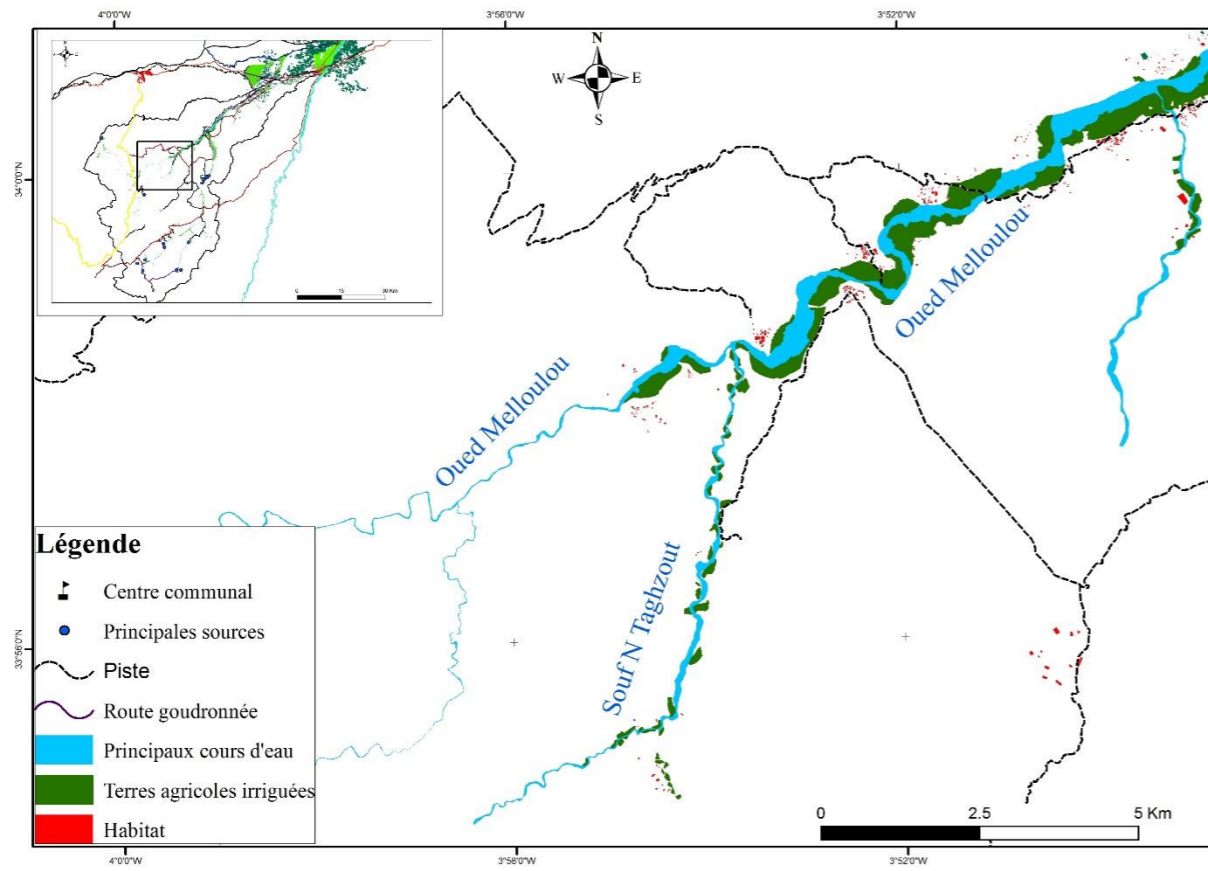


Figure 122 : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2000

Figure 123 : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2018

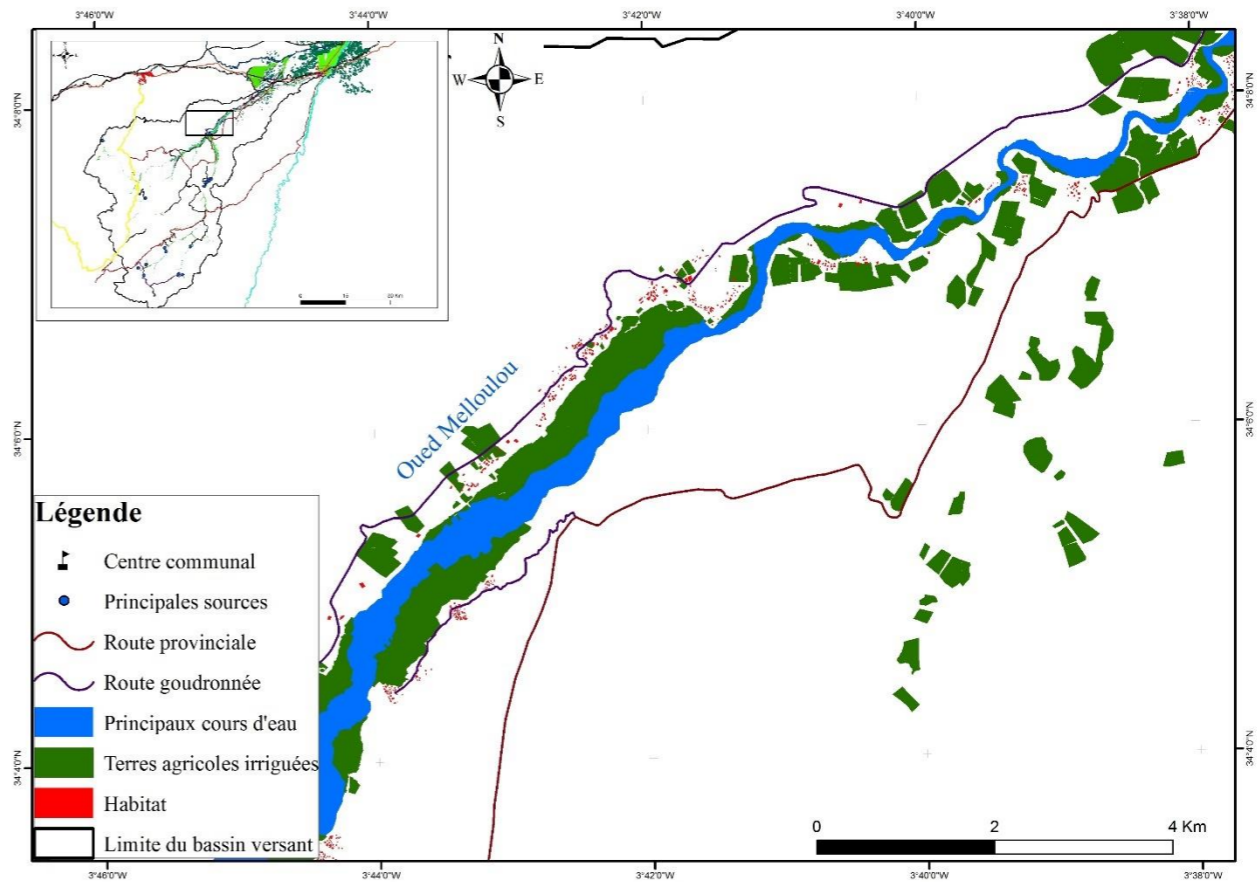
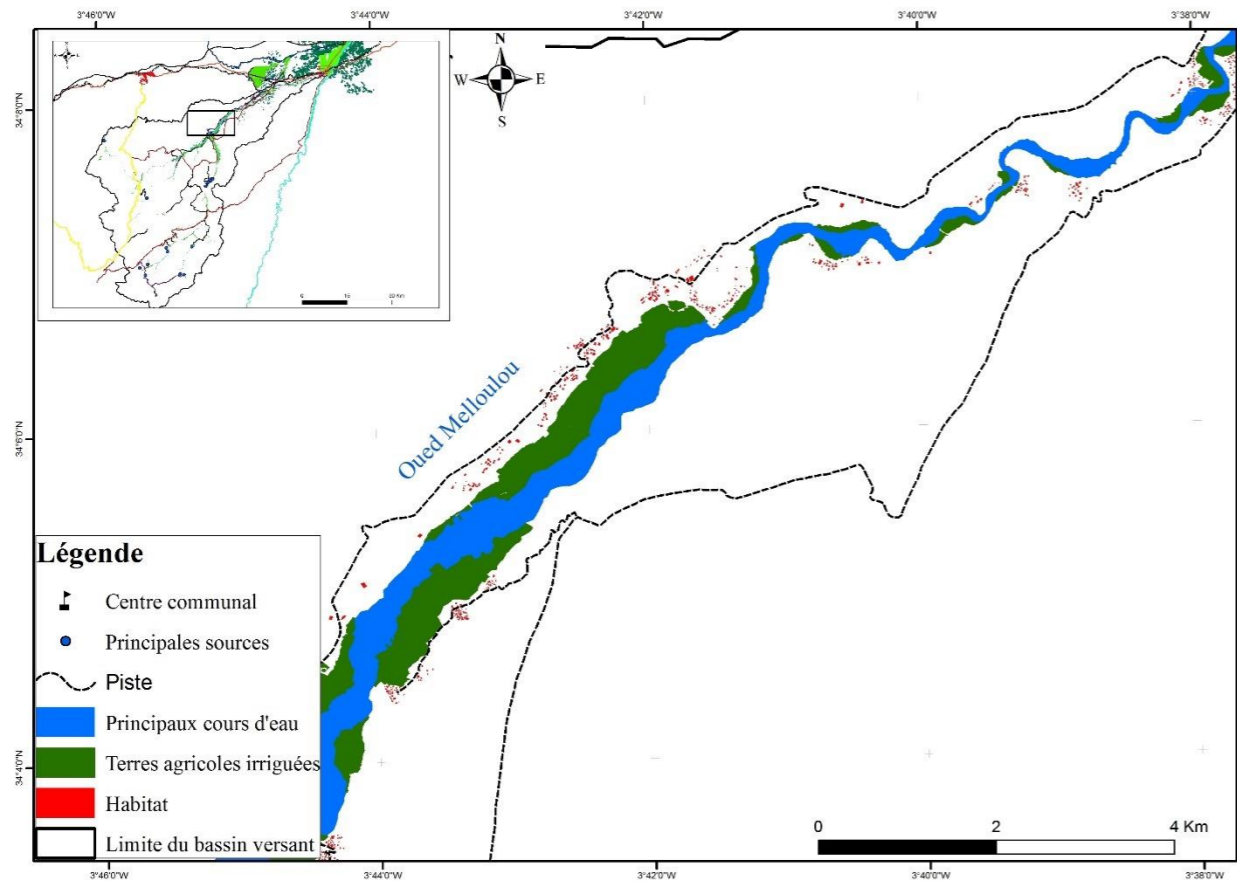
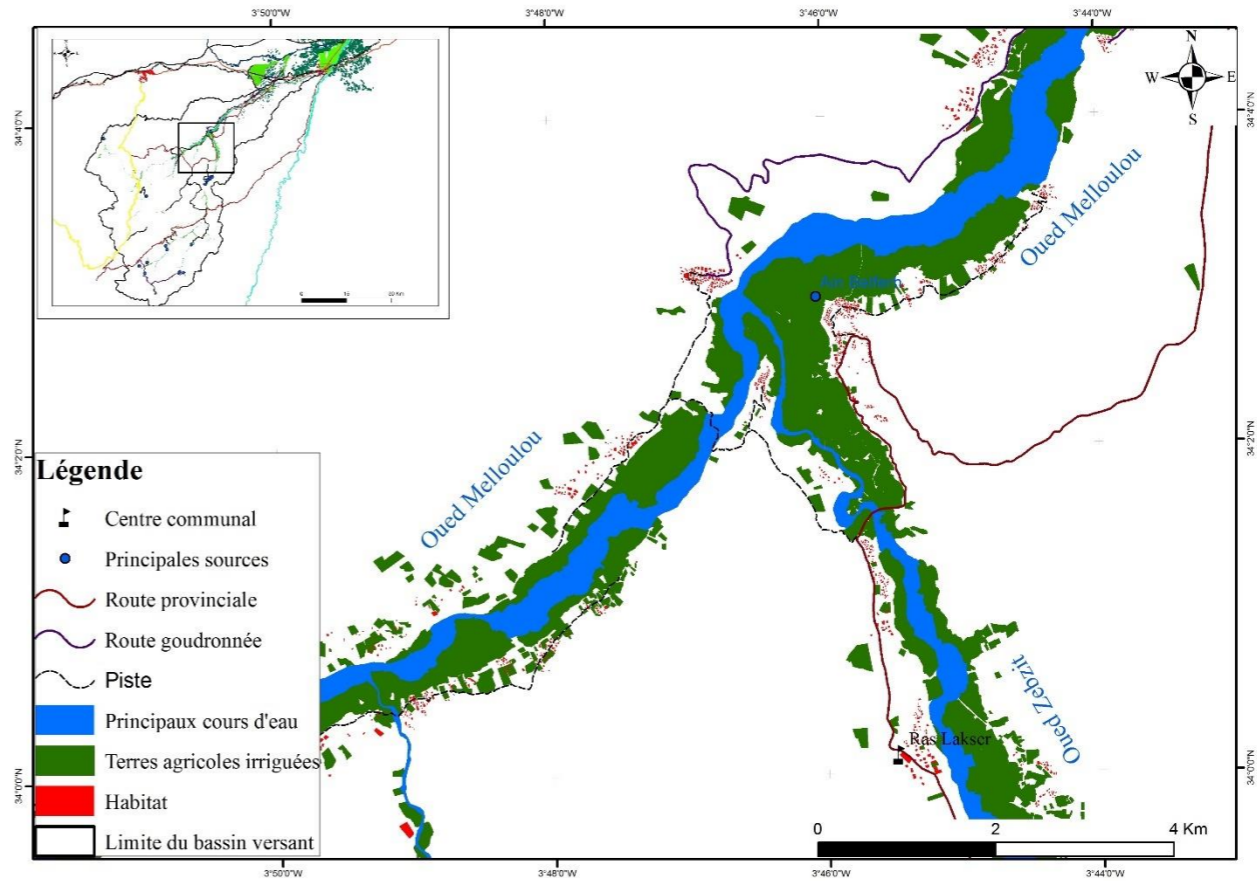
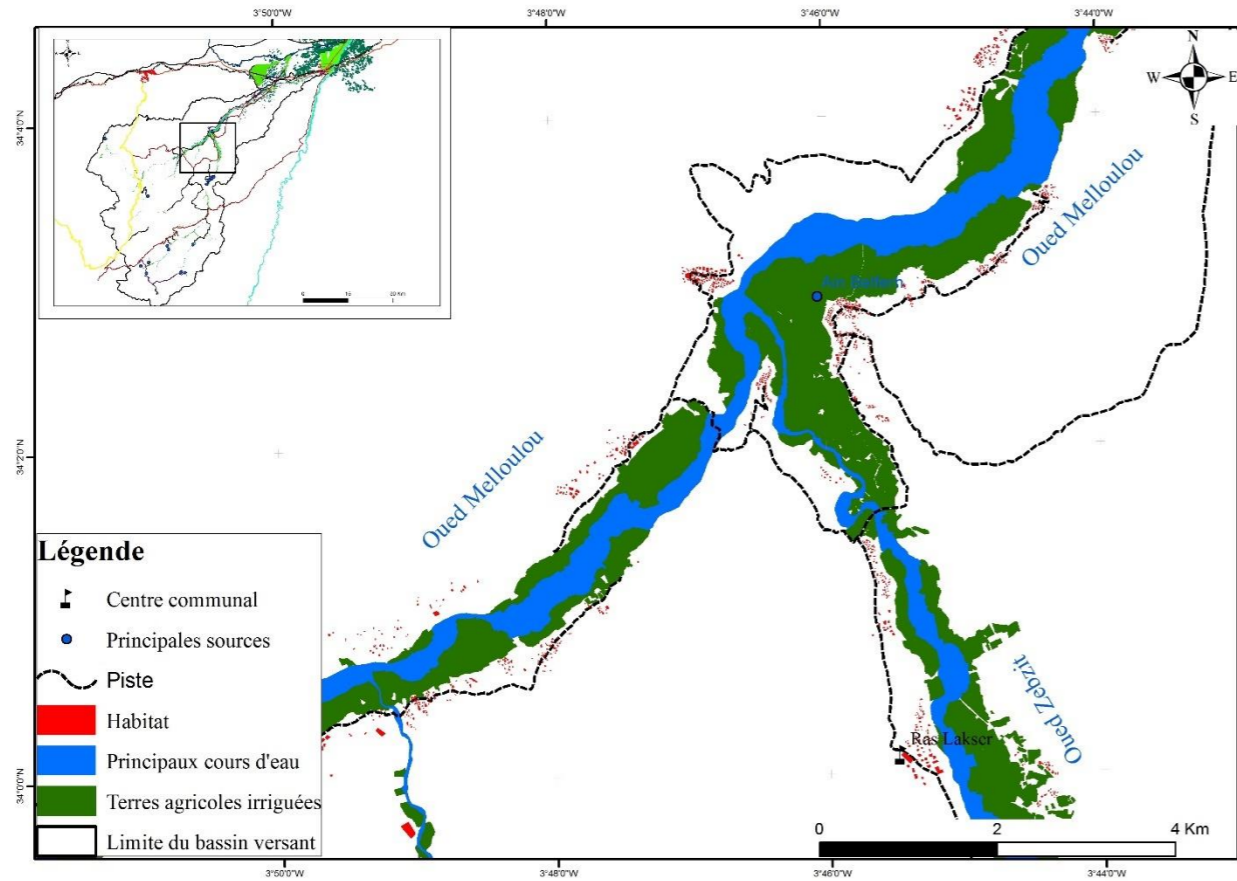


Figure 122 (bis) : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2000

Figure 123 (bis) : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2018

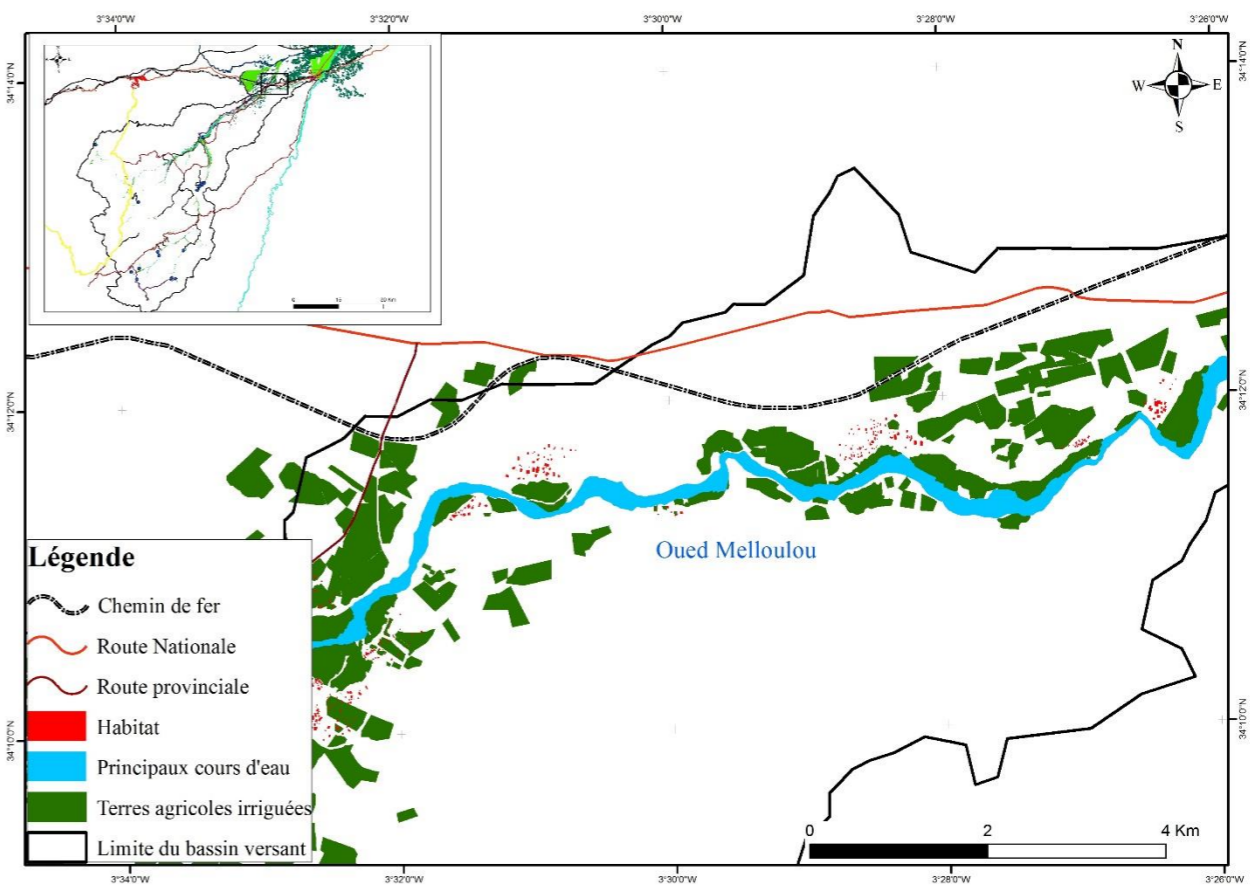
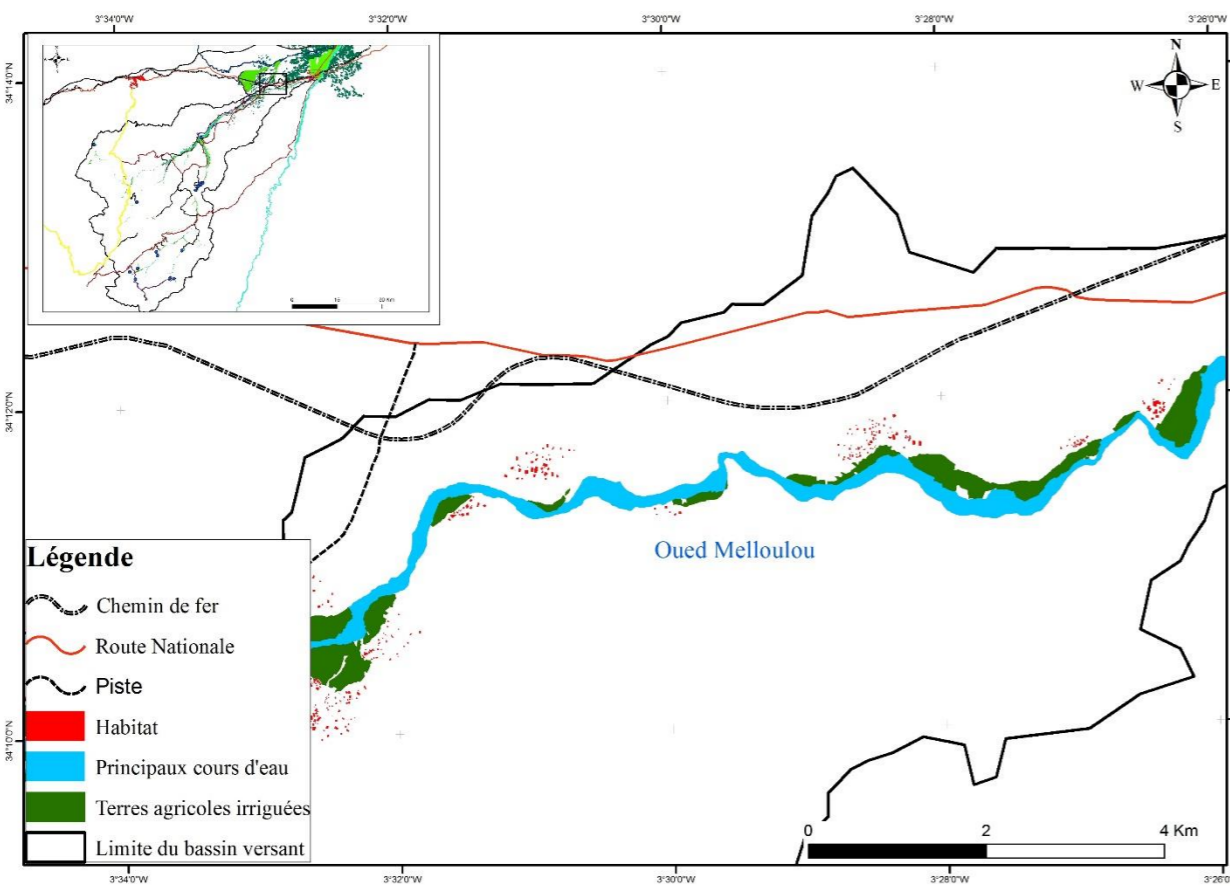
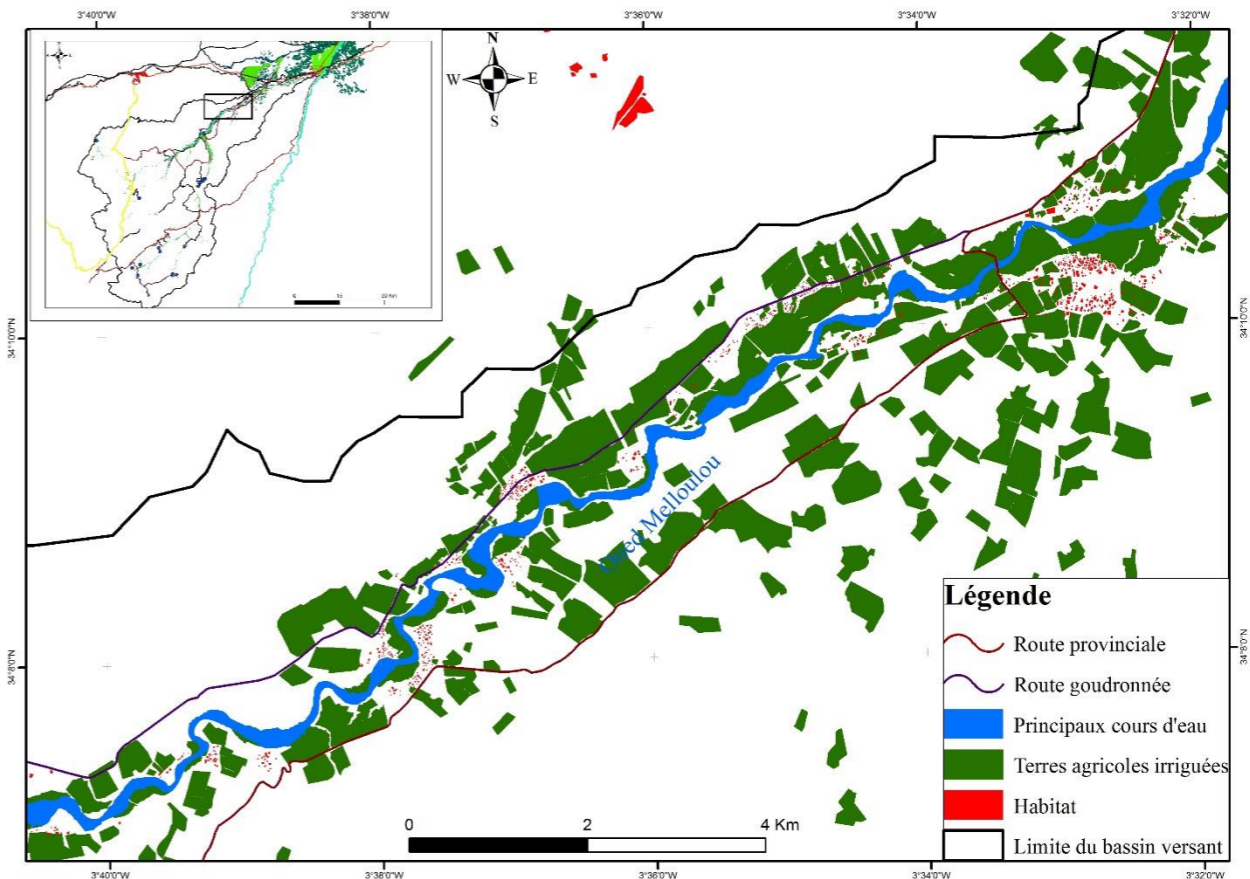
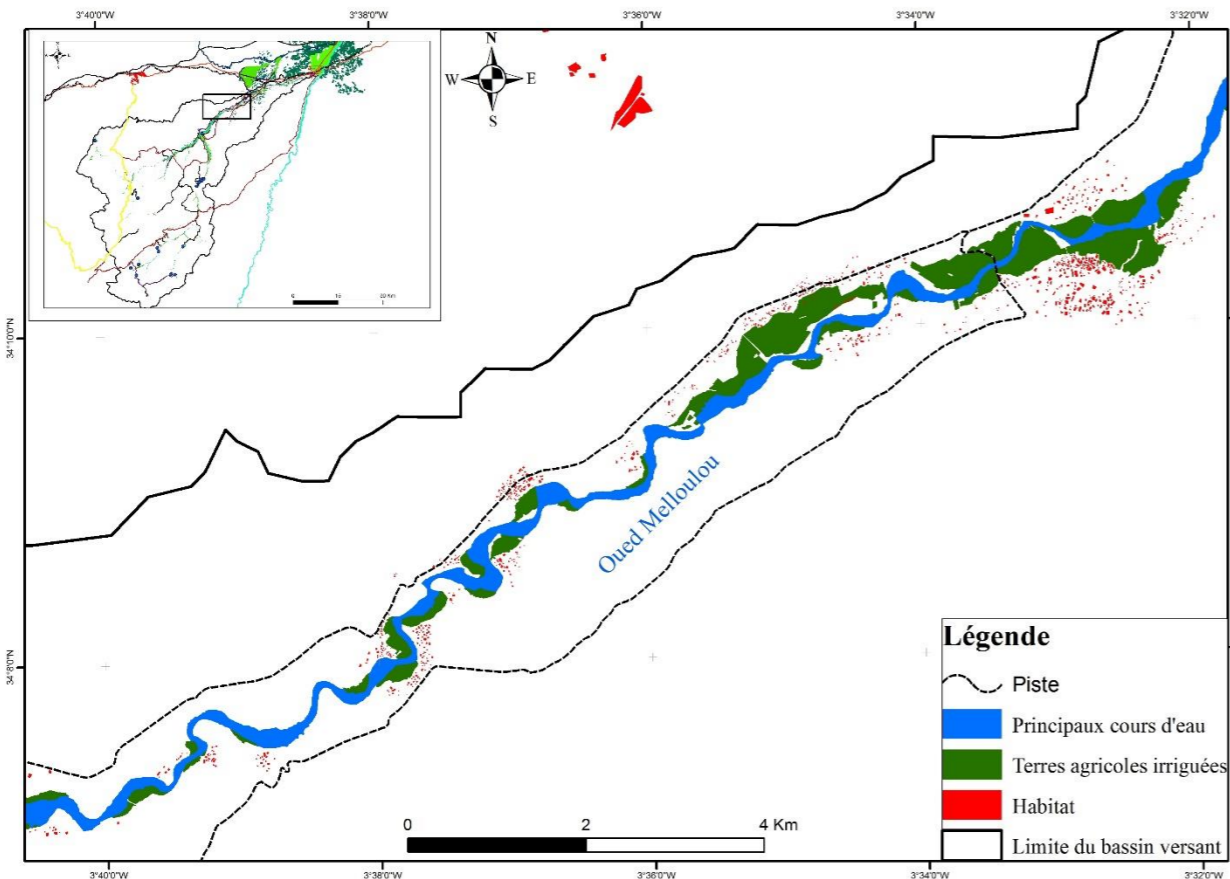


Figure 122 (bis) : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2000

Figure 123 (bis) : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2018

Sachant que la superficie totale des terres agricoles irriguées par les apports de l'Oued est d'environ 4000 ha (plus de 2800 ha sur les basses terrasses et 1100 sur les terrasses supérieures), et la fréquence d'irrigation est, en moyenne une fois par semaine, les besoins en eau agricoles par semaine sont estimés à 1720000 m<sup>3</sup>. A partir de cela, et afin de satisfaire tous les besoins, le débit de l'Oued doit être toujours supérieurs 2.8 m<sup>3</sup>/s.

## **2 Périmètre irrigué de Taddart ; une zone agricole basée essentiellement sur les apports de l'Oued**

Situé à 16 km au nord-ouest de la station hydroclimatique de Belfarah, le périmètre irrigué de Taddart a été créé en 1949 (Mouhdi, 1993). Il est traversé par le chemin de fer et la route nationale N°6, reliant Oujda et Fès. L'alimentation de ce périmètre agricole par les ressources en eaux est assurée par un canal de déviation d'environ 23 Km de longueur, dont les 3 premiers kilomètres sont en galerie. Cette alimentation, commencée en 1953, est faite par une technique spéciale et intelligente. La pente forte du cours d'eau laisse l'eau s'écouler vers le canal de déviation sans créer un seuil ou un barrage. Avec une superficie transversale de 4 m<sup>2</sup>, le débit du canal peut atteindre 2 m<sup>3</sup>/s.

Depuis sa création, ce périmètre irrigué est divisé en exploitations de superficies égales « 5ha » ; ces exploitations sont appelées localement « El Qatâa ». Cependant, cette superficie a été modifiée avec le temps ; elle diminue suite à l'héritage familial ou augmente par l'achat des terres adjacentes par les agriculteurs.

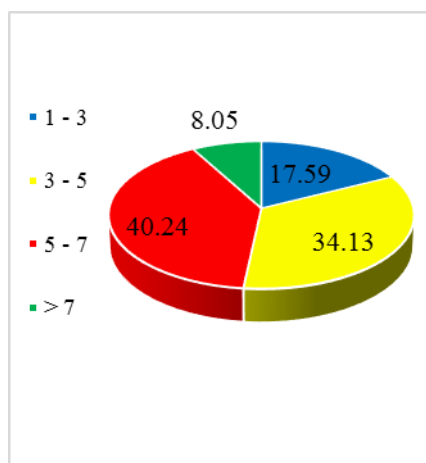
Actuellement, la répartition des tranches des superficies agricoles au niveau de Taddart est comme suit : 18% des exploitations ont une surface oscillent entre 1 et 3 ha, 34% entre 3 et 5 ha et 48% ont une superficie supérieure à 5 hectares.

Afin d'alimenté toutes les exploitations agricoles, le périmètre irrigué de Taddart est aménagé par un réseau de 17 « Seguias » secondaires, construites en béton armé. Cela présente une excellente couverture du périmètre en matière des canaux de transfert de l'eau. Chaque séguia est chargée pour l'irrigation d'une partie donnée (carte112). Ces petits canaux s'alimentent par le canal principal.

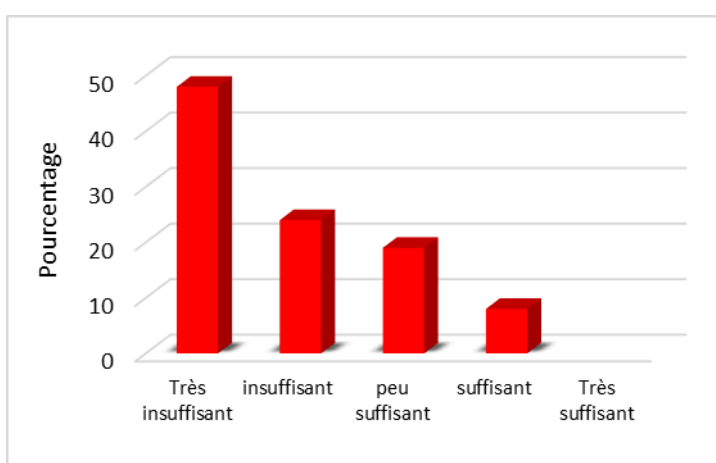
Comme au niveau des terres agricoles sur les terrasses fluviales, le droit d'accès à l'eau pour chaque agriculteur est fait à tour de rôle, appelé localement (**Nouba**). Les enquêtes de terrain montrent qu'aujourd'hui la part de chaque agriculteur à l'eau d'irrigation est de 6

heures par semaine, sauf en cas de crue. Également, la route nationale numéro 6 a divisé ce périmètre en 2 parties : Au niveau de la zone sud, les paysans ont un droit à l'eau de lundi jusqu'à mercredi car elle représente une faible surface, alors que les agriculteurs de la zone nord ont droit du jeudi au dimanche.

Selon les résultats de travail du terrain, environ 70 % des agriculteurs déclarent que leurs parts d'eau sont insuffisantes. Malgré ce problème sérieux, cette zone a connu une expansion remarquable des terres agricoles illégales le long du canal principal. Les nouveaux propriétaires pompent de l'eau à partir de ce dernier, même ils n'ont pas le droit. Cette situation exacerbe le problème de l'insuffisance des ressources en eau dans ce périmètre.



**Figure 125 : Tranches de surface des exploitations agricoles au niveau du périmètre irrigué de Taddart.**



**Figure 126 : Niveau de satisfaction en eau d'irrigation au niveau du périmètre irrigué de Taddart.**

Selon (Martin, 1975), ce périmètre a été créé sur 4 tranches ; entre 1954 et 1975 : 125 ha en 1954, 1000 ha en 1961, 1000 ha en 1973 et 600 ha en 1975. Depuis cette date la superficie irriguée d'environ 2800 ha n'a connu aucune évolution jusqu'au début des années 2000 (Fig. 127).

Avec l'insuffisance des apports hydriques fournis par le canal, la population a commencé à chercher des solutions alternatives pour lutter contre la rareté de l'eau, notamment en période d'étiage et des sécheresses récurrentes. Pour combler ce déficit, nous avons remarqué un recours à l'utilisation des eaux souterraines au niveau du périmètre de Taddart. En effet, 65 % des enquêtés confirment aujourd'hui qu'ils ont un puits destiné à l'irrigation, utilisé d'une façon permanente ou comme une réserve.

## Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels : Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique

Par conséquent, l'exploitation des eaux souterraines est devenue une source d'eau très efficace et permanente, étant donné que l'impact de la sécheresse sur les nappes est très lent. Cette réalité joue un rôle déterminant dans l'expansion des terres agricoles irriguées par les eaux souterraines autour du périmètre de Taddart. En 2018, la superficie totale du périmètre irrigué de Taddart a atteint environ 4200 ha (Fig. 128), dont 1400 hectares sont alimentés totalement par les eaux souterraines. Le territoire a subi en moyenne la création de 77 ha/an, soit 6.5 en moyenne hectares par mois.

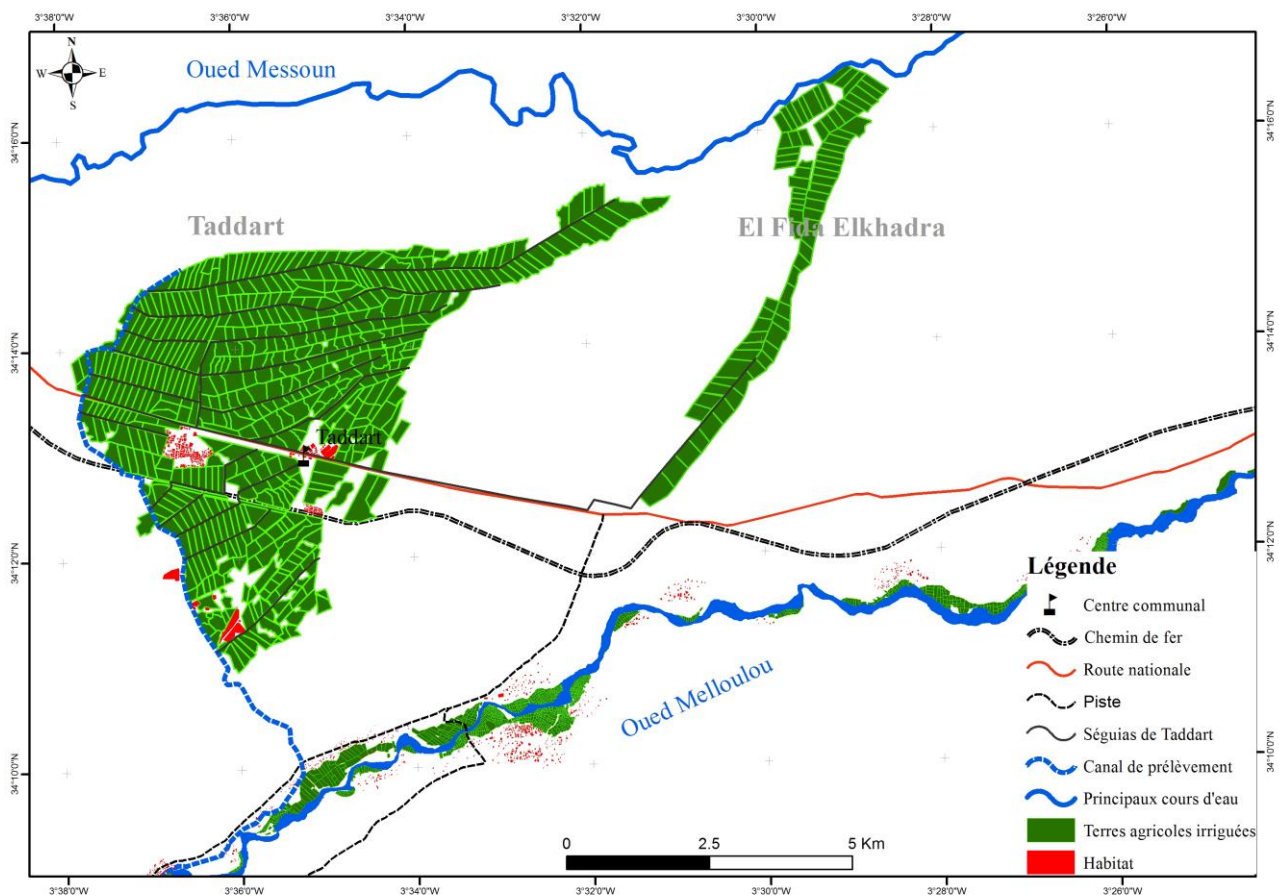


Figure 127 : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Taddart et ses environs en 2000.

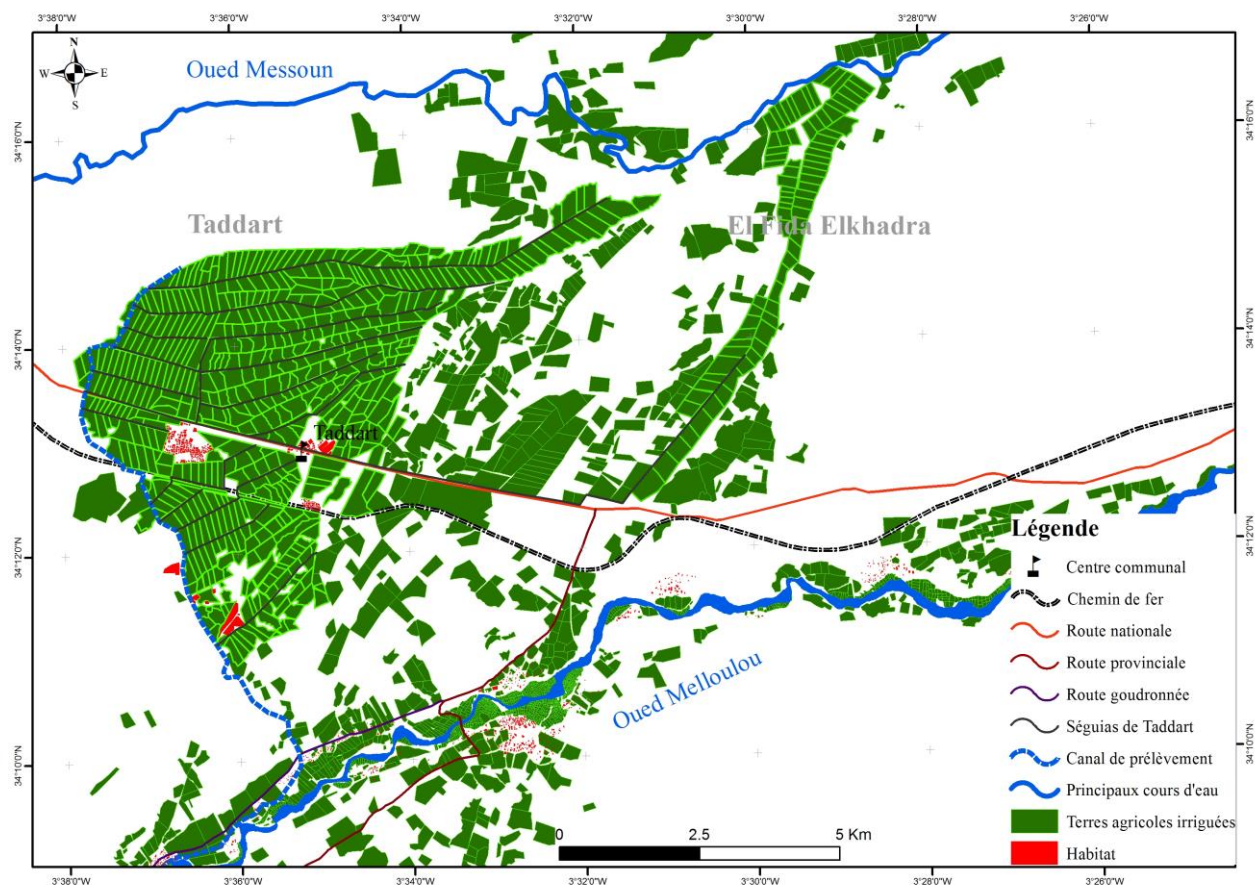


Figure 128 : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Taddart et ses environs en 2018.



Photo 23 : Grand canal de Taddart



Photo 24 et 25 : Exemple des Séguis secondaires de Taddart

### 3 Périmètre irrigué de Guercif, une zone agricole par excellence

Le périmètre irrigué de Guercif a été créé en 1930 sur une superficie de 3000 hectares. Il était encadré au nord par l'Oued Mesoun, à l'est par la Moulouya et au sud par l'Oued Melloulou. L'exutoire de l'Oued Melloulou est situé immédiatement au sud de ce périmètre (Fig. 129). Depuis sa création jusqu'au début des années 1990, ce périmètre a connu une évolution très lente (Mouhdi, 1993). Le prélèvement des eaux pour l'irrigation est fait par un

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

canal de déviation de 4 km de longueur. Ce dernier a une capacité de transfert qui oscille autour de 1m<sup>3</sup>/s de débit. Il prend sa naissance d'une digue en béton armé.

Le périmètre irrigué de Guercif est aménagé par 3 Séguias principaux, chacune chargée de l'irrigation d'une partie donnée : Le Séguia de **Jel** à l'ouest, de **Mdafra** au centre et de **Torche** à l'Est. Les trois Seguia sont en béton.

Comme cité ci-dessus, jusqu'au début des années 1990, la superficie totale du périmètre n'a connu pas d'évolution remarquable. En revanche, des exploitations agricoles irriguées se sont apparues au nord-est entre 1990 et 2000, avec une superficie totale de 900 hectares, soit 90 ha/an.

L'irrigation des terres créées est faite totalement par le pompage des eaux souterraines. Le gasoil, importé de l'Algérie « en contrebande », était en premier lieu, l'énergie utilisée pour le pompage, car ce dernier est moins cher que celui du gasoil national. Mais, au début des années 2000, l'Etat a lancé une campagne massive pour attaquer ce trafic illégal. Par conséquent, cette période était la plus difficile pour le secteur agricole dans la région. Cela reflète négativement sur l'évolution de l'agriculture dans la région. Après, le gaz du butane est devenu une solution efficace et moins chère par rapport au gasoil national.

Aujourd'hui, avec l'apparition de l'énergie solaire, le bassin de Guercif devient une zone agricole par excellence avec une évolution très accélérée. Ainsi, la superficie totale de



**Photo 26 : Digue de transfert des eaux vers le séguia de Guercif (14 mai 2017)**

ce périmètre irrigué est estimée à 12000 ha en 2018, avec une extension de 487 hectares par année, soit environ 40 ha par mois (Fig. 130).

Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique



Photo 27 : Panneaux solaires utilisés pour le pompage



Photo 28 : Pompage de l'eau en utilisant le gaz du butane



Photo 29 : Pompage de l'eau en utilisant le gazoile

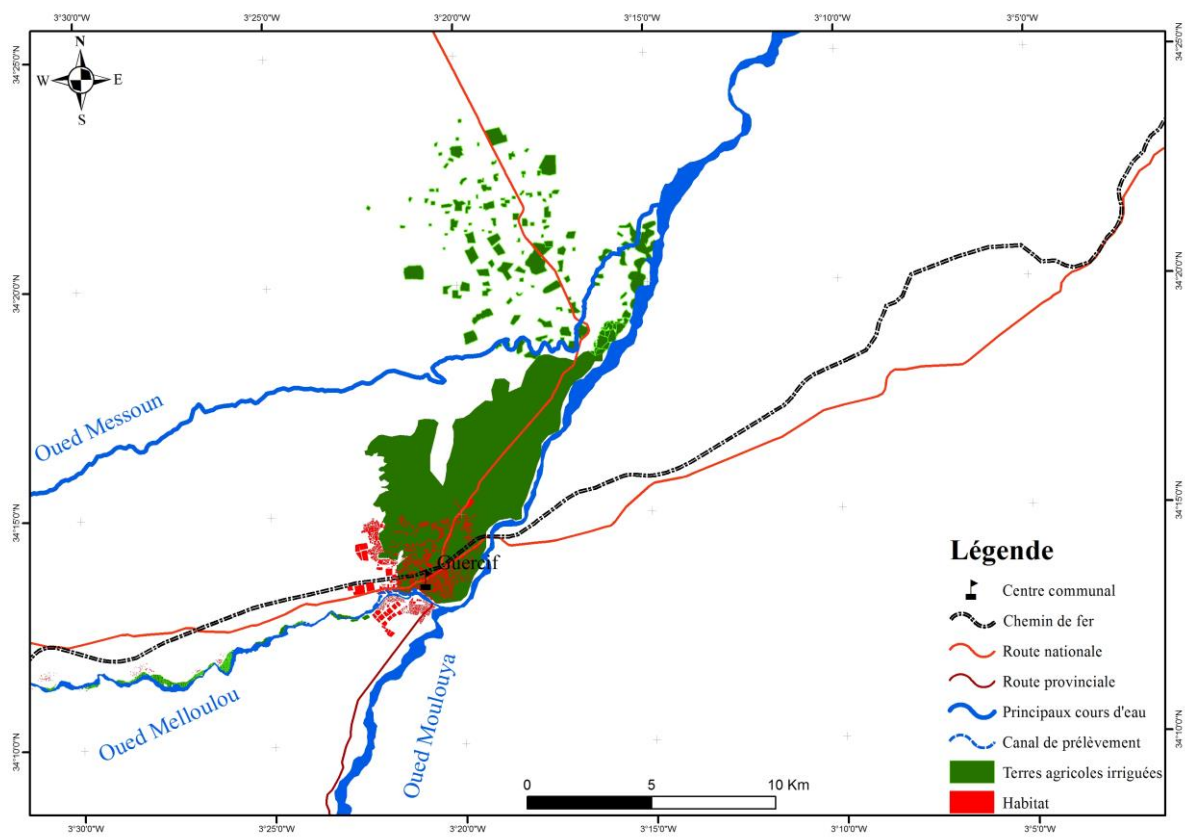
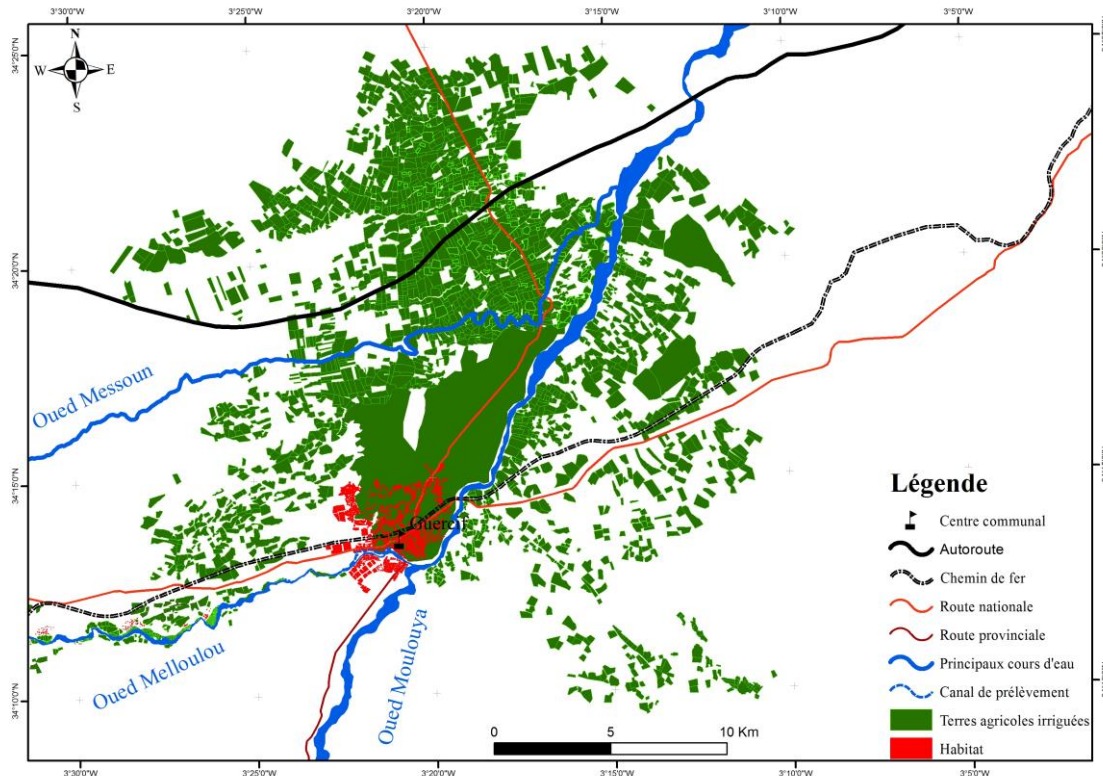


Figure 129 : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Guercif et ses environs en 2000.



#### 4 Superficie des terres irriguées par les eaux souterraines

L'agriculture en irriguer est toujours indispensable pour le développement local de notre zone d'étude. Les terres agricoles sont en évolution rapide, une partie importante des terres aménagées ne peut recevoir toute l'eau nécessaire pour l'irrigation, notamment en période des basses eaux. En effet, aujourd'hui la superficie totale des terres dépendent des apports de la nappe phréatique pour l'irrigation qu'est estimée à environ 13000 ha, distribués entre le bassin de Melloulou, le périmètre de Taddart et le périmètre de Guercif. Cette superficie était seulement de 1000 ha avant les années 2000 (Fig. 116). Ainsi, la majorité des exploitations faisant partie des périmètres de Taddart et de Guercif sont équipées de puits.

L'expansion agricole le plus remarquable est observée en aval, notamment au niveau de la plaine de Guercif. Vers l'amont du bassin de Melloulou, l'importance de cet étalement s'affaiblit. Les enquêtes de terrain et les mesures des niveau piézométriques affichent une tendance vers la diminution qui est estimée en moyenne d'environ 80 cm/an à l'entour du périmètre irrigué de Guercif et de 50 cm/an au niveau de la zone de Taddart, alors qu'aucune diminution importante n'a été observée en amont. La profondeur des puits dépasse actuellement les 100 m dans quelques points au niveau de la plaine de Jel, à l'Ouest de Guercif

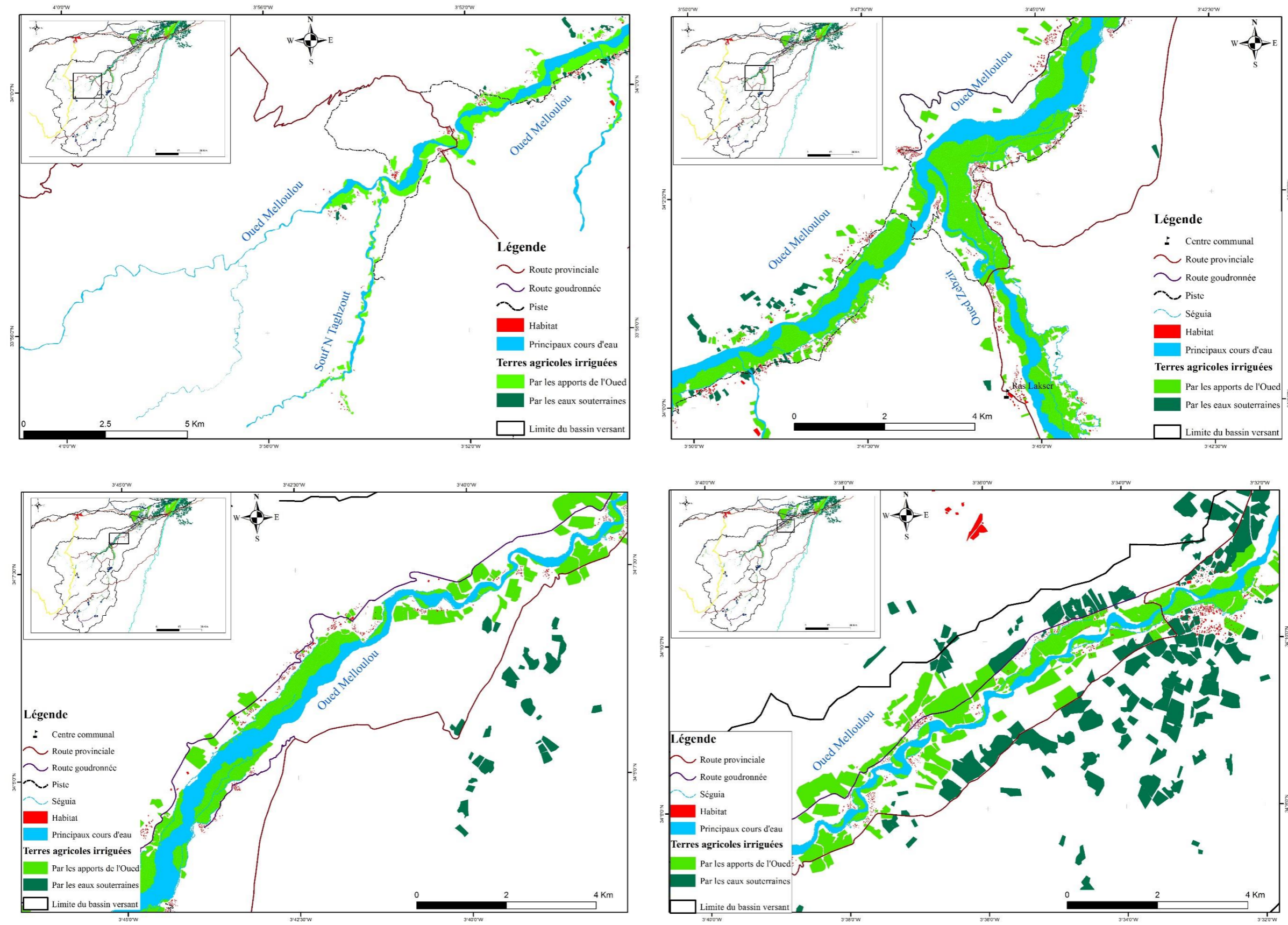


Figure 131 : Cartes montrant les types d'eau utilisée pour l'irrigation pour chaque tronçon

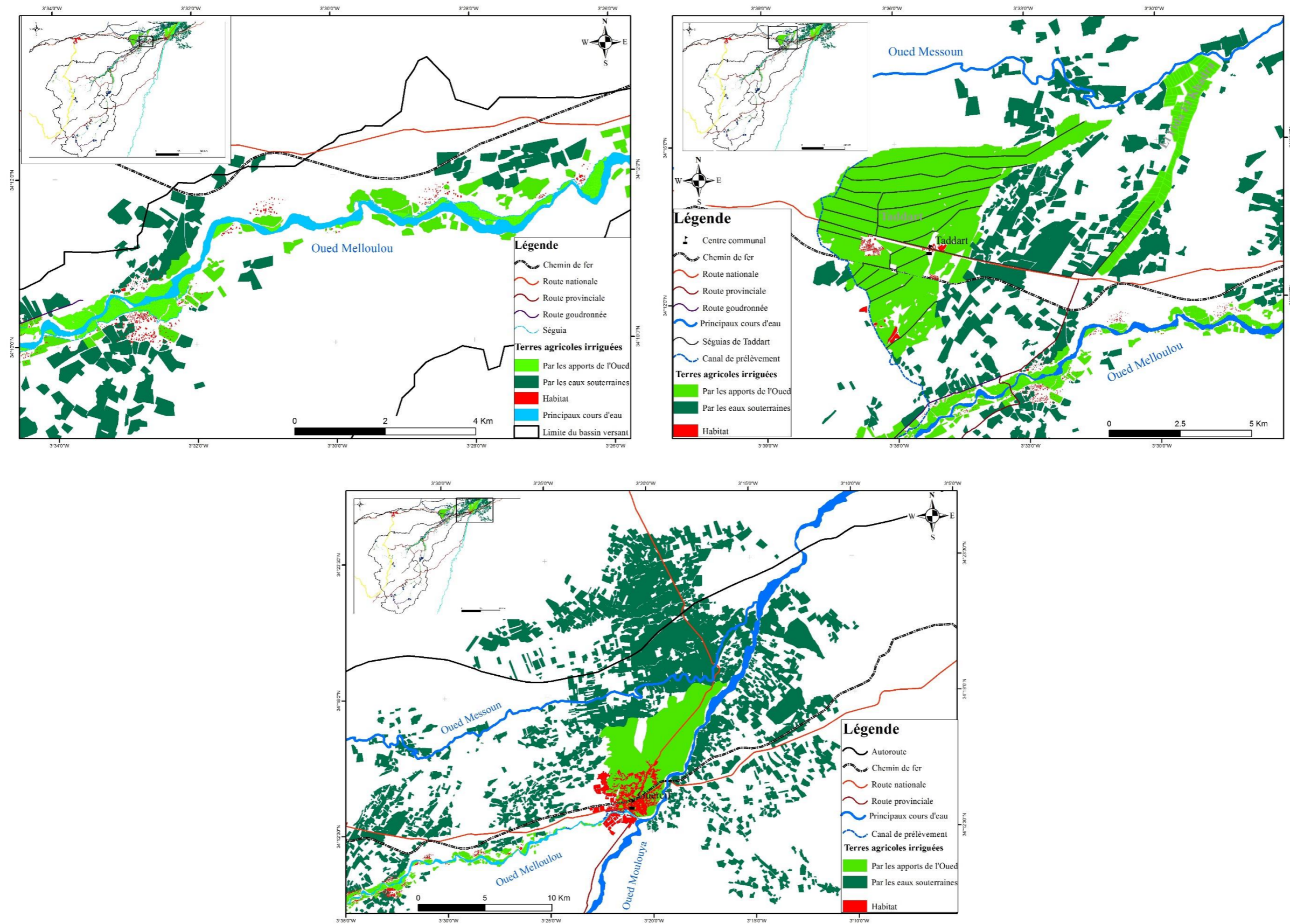


Figure 131 (bis) : Cartes montrant les types d'eau utilisée pour l'irrigation pour chaque tronçon

## **5 Gestion de l'eau agricole**

### **5.1 Rôle de « Jmaâ » en amont du bassin versant de l'Oued Melloulou**

« **Jmaâ** » est une organisation constituée d'un ensemble de fractions présentée par les personnes les plus âgées et ayant un poids dans chaque **fraction**. « Une fraction est une grande famille ». Cette organisation sociale a pour objectif de gérer toutes les affaires publiques de la tribu (l'eau, les pâturages, les forêts, la mosquée ...)

Au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou, les « **Jmaâ** » ont développé de nombreuses coutumes et ont construit des systèmes techniques pour une bonne gestion de la ressource en eau. Comme nous l'avons déjà mentionné, chaque tribu utilise un « Seguia » pour l'irrigation.

Dans le domaine de la gestion des ressources en eau, la « **Jmaâ** » a assuré l'équilibre social au niveau de la tribu, résolu la majorité des problèmes posés dans le domaine de la gestion des ressources en eau et contrecarré les conflits. Dans ce contexte, il est important de citer des exemples de coutumes qui assurent la continuité du système de gestion des ressources en eau : 1) En respectant les besoins en eau, les lois coutumières locales donnent l'avantage d'exploitation de l'eau aux agriculteurs de l'amont. 2) Chaque propriétaire de la terre a le droit d'accéder à l'eau d'irrigation. 3) s'il n'y a pas de solution, la population aval a le droit de creuser son Séguia dans les parcelles agricoles des propriétaires de l'amont et ainsi de suite jusqu'au lit de l'Oued.

La « **Jmaâ** » est présentée par « **El Amel-n-Targa** ». Cette personne, chargée d'assurer le respect de la loi, des coutumes et des droits à l'eau pour chaque agriculteur « Fellah ». « El Amel-n-Targa » doit être propriétaire de la terre, avoir le droit à l'eau dans la tribu, être sage et connaître les techniques de distribution de l'eau entre les fractions de la tribu et les coutumes la gérant. La distribution de l'eau est faite au tour de rôle.

A titre d'exemple, au niveau de « Seguia » de Laoulijat-Tghari, le tour est en « une journée pour chaque fraction » comme le montre la figure 132.

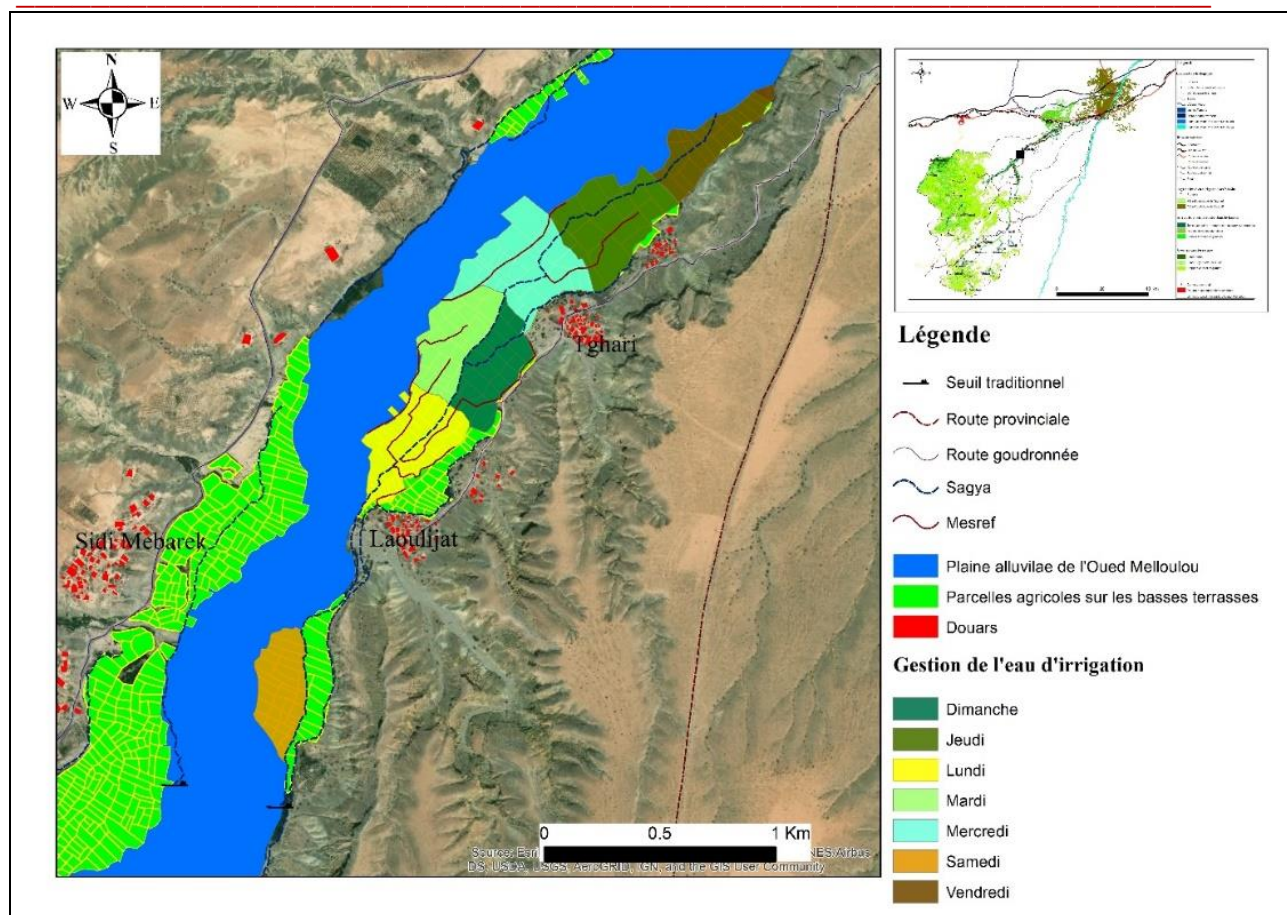


Figure 132 : Exemple de carte de gestion des droits à l'eau sur les terrasses agricoles

## 5.2 Rôle des associations d'usagers des eaux agricoles (AUEA) en aval.

Les agriculteurs propriétaires de la terre au niveau des périmètres de Taddart et de Guercif ont des origines différentes. Par conséquent, les notions de tribu, fraction et « *Jmâa* » n'existent pas. Ainsi, la gestion de l'eau est faite par des institutions modernes. Il s'agit des associations d'usagers des eaux agricoles (AUEA).

En décembre 1990, la loi n° 2-84 a autorisé la création des associations d'usagers de l'eau, le décret n° 2-84-106 du mai 1992 a fixé les modalités d'accord entre l'administration et les AUEA et a approuvé le statut-type de ces associations. L'objectif principal de la création des AUEA, soit par les administrations de l'état (Direction Provinciale d'Agriculture par exemple), soit par l'initiative des habitants, est de permettre la participation des usagers de l'eau agricole à la réalisation de programmes de travaux, à la gestion et à la conservation des ouvrages d'utilisation de l'eau d'irrigation... (El Alaoui, 2004).

Ces organisations impliquent et responsabilisent effectivement les agriculteurs usagers de l'eau d'irrigation dans la gestion des ressources et des équipements qui les concernent. Elles

sont des outils essentiels pour la réussite des programmes d'amélioration du service de l'eau et de l'économie de l'eau.

### **5.2.1 Contraintes des AUEA dans le domaine de la gestion de l'eau**

Si l'organisation de « Jmâa » est constituée des personnes dignes de confiance, sages et les plus âgés de la tribu. La gestion des affaires publiques de la tribu est basée donc sur la confiance et l'obéissance absolue des décisions immanentes des personnes représentées dans la « Jmâa ». Par ailleurs, Les **AUEA** comprennent un groupe d'agriculteurs peuvent avoir des origines différentes. Cette structure hétérogène peut créer des confrontations lors des assemblées générales pour l'élection du président et du conseil administratif. Également, le manque de confiance a une influence sur la collecte des participations des agriculteurs dans le cadre d'entretien des canaux et ou la réalisation des projets hydro-agricoles.

La faiblesse de la communication avec les adhérents, l'ignorance des règlements des associations et la faiblesse du niveau d'étude des membres sont aussi des problèmes qui perturbent la marche normale des **AUEA** à atteindre leurs objectifs.

### **5.3 Rôle du Caïd dans la gestion de l'eau**

Par sa fonction, le Caïd est amené à juger des conflits non résolus par l'organisation locale « **Jmâa** ». Il s'agit généralement de conflits inter-tribu ou interpersonnels fréquents. La plupart de ces conflits sont liés à la gestion de l'eau notamment le non-respect du planning établi d'irrigation et la non-participation dans l'entretien des Séguias ...

Pour les tribus **d'Ayt Ouarayn**, depuis longtemps, le recours au caïd, ou « **Makhzen** » en général, pour le règlement des conflits est évitable et il n'est pas préférable. Mais dans les cas d'extrême conflit, la présence du « **Makhzen** » dans la résolution des problèmes liés à l'eau est souhaitable. Toutefois, d'après la population nomade, il semblerait que les conflits non résolus par la « **Jmâa** » soient portés devant le Caïd. Par ailleurs, en cas de conflits importants non résolus par le caïd, le litige peut être porté devant les tribunaux.

Le caïd est aussi chargé de l'authentification des personnes qui veulent participer dans la création des Associations des Usagers de l'Eau Agricole **AUEA**. Il est aussi responsable du suivi, du contrôle et de la mise en place de certains projets de développement agricole.

## **6 Facteurs expliquant l'extension des terres agricoles**

### **6.1 Coutumes, un facteur important dans l'évolution illégales des terres agricoles**

Si les règles coutumières sont des lois efficaces pour la gestion du territoire dans le bassin versant de l'Oued Melloulou, celles-ci ont créé un sérieux problème sur le terrain. Il s'agit de transmettre chez la majorité des agriculteurs que l'eau est une ressource libre d'accès et permanente. Ainsi, les paysans ne prennent pas en considération les variations actuelles du débit de l'Oued et ses impacts sur la population en aval. Ces coutumes ont contribué en quelque sorte à l'expansion des terres agricoles.

### **6.2 Rôle du Plan Maroc Vert**

Au Maroc, le secteur agricole est au centre des préoccupations du développement local et de la sécurité alimentaire. En effet, l'importance de l'agriculture dans le tissu économique du pays est clairement visible. Il contribue pour 15 à 20 % du PIB national et assure 3 à 4 millions d'emplois permanents (Qadem, 2015). Pour cette raison, le Maroc a lancé en avril 2008 une nouvelle stratégie nommée Plan Maroc Vert pour faire de l'agriculture un moteur de croissance économique et pour lutter contre la pauvreté rurale.

Le Plan Maroc Vert est une nouvelle stratégie ambitieuse visant à faire du secteur agricole marocain un véritable levier du développement socio-économique au Royaume, à travers l'accélération de la croissance, la réduction de la pauvreté et la consolidation de l'intégration de l'agriculture aux marchés national et international.

Cette nouvelle stratégie fournit des financements importants pour l'aménagement et la réhabilitation des terres agricoles en irriguer. Ces financements peuvent atteindre 100%, pour les petites exploitations, inférieurs ou égale à 5 ha, et 80% pour les grandes fermes. Ils couvrent le creusement et le cuvelage des puits ou des fourrages, les équipements de pompage de l'eau, l'aménagement et le revêtement des bassins de stockage et la fourniture et la distribution des tuyaux et distributeurs d'eau d'irrigation. Ainsi qu'un ensemble d'accessoires de filtration, de fertigation, appareillages de contrôle et de régulation ....

Ces subventions destinées aux agriculteurs locaux contribuent d'une façon remarquable dans l'évolution des terres agricoles et par conséquent dans la surexploitation des eaux de surface et souterraines en même temps.

## **7 Dynamique des terrasses agricoles sur les terrasses fluviales**

Si l'eau constitue une source de vie et de bien-être des nomades, elle représente dans certaines constances un malheur pour les agriculteurs. En effet, les crues violentes provoquent des inondations qui génèrent des dommages importants au niveau des terrasses agricoles situées le long de l'Oued. Ces forts débits produisent des pertes en matière de produits agricoles par la submersion, mais également en matière des terres par le sapement des berges et la dynamique hydromorphologique du cours d'eau.

Grâce aux larges terrasses fluviales en aval, la majorité des activités agricoles se localisent autour de la confluence de l'Oued Melloulou avec celui de Zebzit jusqu'à la station hydrométéorologique de Belfarah en aval. L'étude diachronique de cette partie a mis en évidence un certain nombre de changements morphologiques et paysagers. Dans ce contexte, il est d'une importance particulière de quantifier ce phénomène et de distinguer les origines de ces modifications.

### **7.1 Dynamique des terrasses agricoles**

Afin de visualiser la dynamique des terrasses agricoles en fonction du temps, une approche cartographique a été élaborée. Elle consiste en une superposition des terrasses fluviales agricoles et de la plaine alluviale de l'Oued Melloulou sur deux dates différentes. Pour ce faire, les images satellitaires couvrant le tronçon choisi ont été utilisées. Elles correspondent aux dates de décembre 2002 et de décembre 2018. Le tronçon choisi est caractérisé par une occupation humaine dense.

Entre 2002 et 2018, les résultats obtenus montrent un déclin de la superficie des parcelles agricoles sur les terrasses fluviales, avec un élargissement de la plaine alluviale du cours d'eau. En effet, la largeur moyenne de la plaine alluviale est passée de 260 mètres à 440 mètres. Cet élargissement a entraîné la perte d'environ 208 ha de terres agraires soit 11.5 ha/ans en moyenne.

D'un point de vue socio-économique, et étant donné que la plupart des familles possèdent moins de 1 ha/ménage, la perte de 11.5/ha par an contribue à l'appauvrissement de plusieurs familles, qui vont chercher des solutions alternatives et choisissent souvent l'exode vers la ville de Guercif ou autres villes du pays.

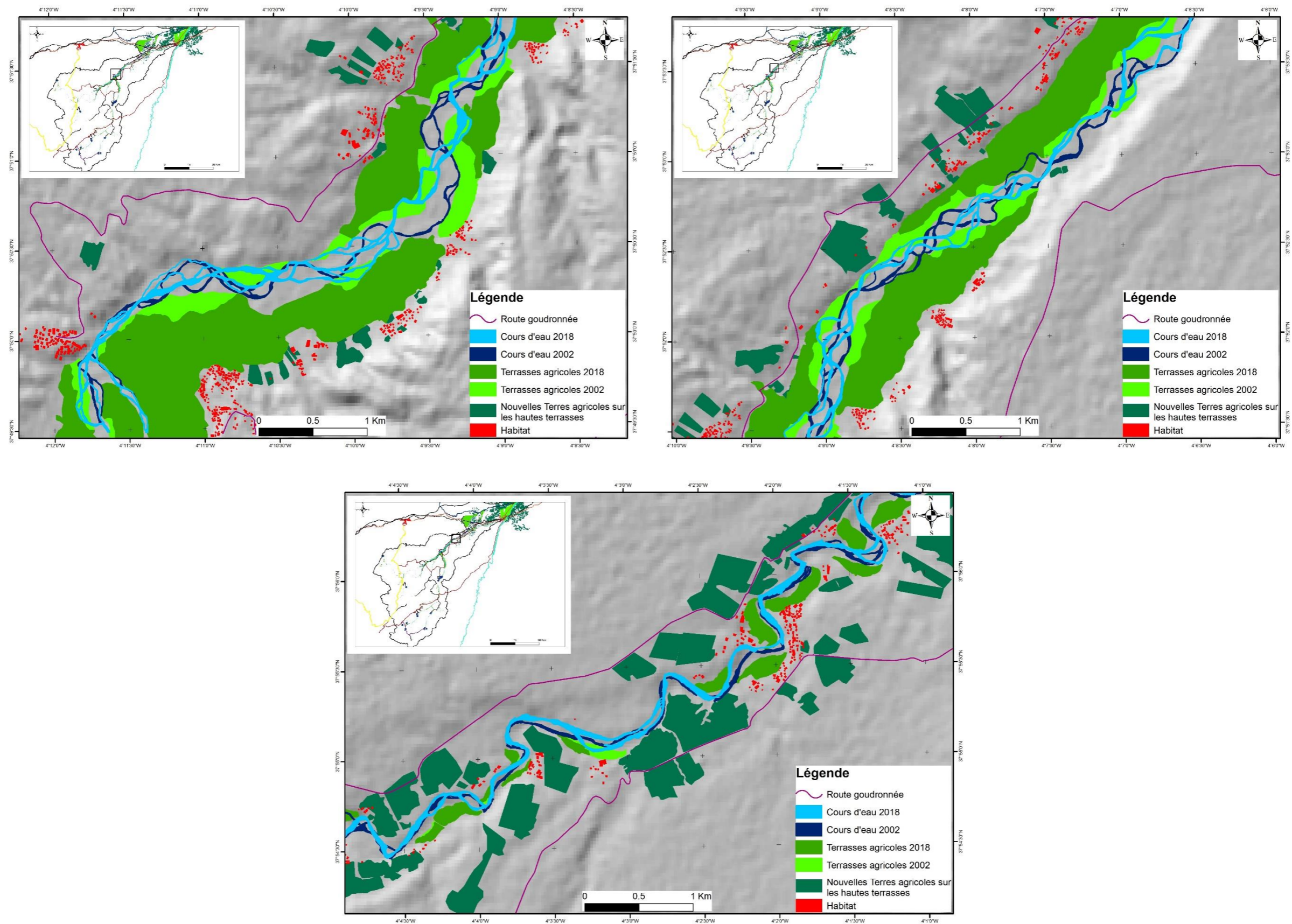


Figure 133 : Cartes de la dynamique des terrasses fluviales entre 2002 et 2018

## **7.2 Facteurs causaux de la dynamique des terrasses agricoles**

La dynamique des terres agricoles constatée au niveau du tronçon choisi nous a laissée poser la question des facteurs explicatifs de cette dynamique. Dans ce contexte, nous avons évoqué l'ensemble des conclusions obtenus dans les chapitres précédents.

### **7.2.1 Facteur hydroclimatique**

Sachant que la pluviométrie constitue le moteur des écoulements superficiels et que l'écoulement est à l'origine direct de chaque modification morphologique des cours d'eau, on s'est focalisé sur les résultats des analyses statistiques des paramètres hydroclimatiques obtenus dans les deux chapitres précédents.

Concernant les paramètres climatiques, nous avons constaté une tendance vers l'augmentation des précipitations cumulées annuelles dans la totalité du bassin versant de l'Oued Melloulou et plus particulièrement, nous avons remarqué une augmentation des pluies automnales. Ces dernières qui sont d'origine convectives et très concentrées dans le temps et dans l'espace. Ces tendances sont significatives en aval au seuil de  $\alpha=0.05$ . Ainsi, les ruptures les plus significatives sont observées également au niveau des bases de données enregistrées dans les stations avales. Les dates des ruptures sont autour des années 2000 avec une augmentation après ces points de changement.

L'analyse statistique des événements pluviométriques extrêmes ( $P_{jmax}$ ) montre ainsi des ruptures significatives au niveau des deux stations avales, en 1993 à Guercif et en 1996 à Belfarah, suivies par une augmentation des valeurs des  $P_{jmax}$ . La tendance générale est strictement positive au niveau des deux séries. L'ajustement de ce paramètre via le modèle (GEV) montre des valeurs assez élevées en fonction des temps de retour choisis.

L'analyse statistique des températures qu'on dispose montre une tendance vers l'augmentation des températures moyennes maximales et températures moyennes.

D'après l'ensemble des conclusions, il ressort que les conditions climatiques ont une contribution remarquable dans la dynamique des terrasses agricoles

En revanche, l'analyse statistique des données hydrométriques enregistrées dans les stations de mesures qui s'installent au cœur de notre bassin versant montre une tendance vers l'augmentation des valeurs des débits moyennes journaliers maximum et des débits

instantanés maximum (débits de crue). Après le début des années 2000, les crues sont très puissantes selon les résultats de l'indice de Pardé et les valeurs estimées via les lois de probabilité utilisés dans le chapitre précédent

### **7.2.2 Rôle de l'anthropisation dans la dynamique du cours d'eau**

L'analyse des résultats des enquêtes et des interviews, réalisées entre 2016 et 2019, montre que l'installation humaine intense a été débutée depuis des décennies. Les tribus d'Ayt Ouarayn, constituent les nomades de la zone. À l'époque, l'élevage était l'activité économique principale de cette population avec une pratique de céréaliculture « Bour » en amont.

Avec la dégradation de la transhumance et le recul de l'élevage en amont, les familles commencent à s'installer progressivement sur les rives de l'Oued en aval. Afin d'assurer leur sécurité alimentaire, dans un contexte aride caractérisé par une faible pluviométrie et une faible rentabilité des terres, un recours vers l'agriculture en irriguer a été observé. L'augmentation du nombre de familles installées et la croissance démographique exercent une grande pression sur les anciennes terrasses. Dès les années 1970, suite à une longue sécheresse qu'a connue le Maroc et avec la régression des évènements hydrologiques extrêmes qui peuvent probablement détruire les produits, les paysans locaux ont créés des nouvelles terres sur la plaine alluviale. Cette extension des terres agricoles a contribué donc dans la dégradation des écosystèmes fluviaux et a fragilisé la plaine alluviale aux crues et aux inondations.

### **7.2.3 Déracinements de la ripisylve rendent les terres exposées aux courants fluviaux**

La ripisylve est une formation végétale naturelle située sur les rives des rivières. Elle peut être limitée à un cordon arboré étroit qui souligne le bord du lit mineur de la rivière, ou bien se présente en une véritable forêt alluviale (Idrissi, 2019). Comme on le sait, la végétation occupant les berges joue le rôle principal dans la protection de ces dernières face à l'érosion latérale. Cette protection est essentiellement en fonction de la densité et de la profondeur des racines... En effet, il est reconnu de longue date que les cours d'eau, évoluant sous couvert forestier présentent de plus faibles largeurs que ceux bordés par une végétation herbacée. Il est généralement admis que la présence d'une végétation ligneuse renforce la

résistance des berges (Depret, 2014). Ainsi, la présence de la ripisylve est nécessaire pour un bon fonctionnement du cours d'eau.

Au niveau de tronçon traité, les berges des cours d'eau sont des espaces convoités par les activités agricoles. Ces dernières détruisent totalement la ripisylve. Cette situation rend les berges exposées directement face à tous les événements hydrologiques extrêmes.



**Photo 30 et 31 : Contact direct entre les activités agricoles et les berges du cours d'eau au niveau de l'oued Melloulou aval**

#### **7.2.4 Rôle de la lithologie**

La lithologie est l'un des principaux facteurs contrôlant l'érosion hydrique. La partie étudiée est caractérisée par un affleurement lithologique fragile, marnes bleues de miocène et des alluvions récents, ce qui la rend fortement vulnérable à l'érosion fluviale. Cet aspect s'est manifesté dans les pertes des terres agricoles détectées précédemment et dans l'évolution de la largeur de la plaine alluviale.

Le profil en long du tronçon montre une très faible pente du cours d'eau, la pente moyenne est d'environ 0.5%. Cette caractéristique de relief constitue aussi un facteur crucial dans le processus de la dynamique latérale fluviale et les pertes en terres dans le territoire.

#### **Conclusion du chapitre**

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent :

Le rôle crucial qu'ont joué l'Oued Melloulou et ses affluents dans la vie des nomades. Ces cours d'eau représentent l'artère de vie pour l'économie locale de la population. L'abondance de l'eau en permanence fournit une occasion d'une expansion énorme des terres agricoles le long de l'Oued pendant ces dernières années.

La pression sur la ressource en eau dans le bassin n'est pas similaire. En effet, elle semble que les activités agricoles consomment de l'eau au niveau de la partie amont sont faibles,

tandis qu'en aval, les terres agricoles irriguées sont en évolution accélérée d'une année à une autre. Cette situation augmente fortement la demande sur cette ressource vitale dépassant la capacité de l'Oued et notamment pendant la période des étiages. Face à cette pénurie en eau et avec l'apparition de l'énergie solaire utilisée pour le pompage, le recours aux eaux souterraines devient une solution efficace pour combler ce déficit. Ce mode d'irrigation a été décelé premièrement au niveau du périmètre irrigué de Guercif et de Taddart.

Les méthodes de gestion des ressources en eau ne sont pas les mêmes dans tout le bassin. En effet, la **Jmâa** constitue l'organisation traditionnelle chargée de gérer toutes les affaires des tribus en amont. Alors qu'en aval, les associations des usagers de l'eau agricole prennent la place de **Jmâa** dans la gestion de l'eau agricole.

Si l'eau constitue une source de vie et de bien-être, elle constitue également une menace pour les agriculteurs. En effet, au niveau du bassin de Melloulou, nous avons remarqué que les crues violentes provoquent des inondations générant des dommages importants au niveau des terres agricoles situées le long de l'Oued. Ces dernières produisent des pertes en matière de produits agricoles par la submersion lors des crues, mais également en matière des terres par le sapement des berges et la dynamique hydromorphologique du cours d'eau.

## **Conclusion générale**

L'objectif de ce travail de thèse est de mettre en évidence le fonctionnement hydrologique du bassin versant de l'Oued Melloulou qui est l'affluent principal de la Moulouya en participant à 40% de son débit. Il a par conséquent un rôle indispensable dans l'alimentation en eau des périmètres irrigués qui se situent en aval. Il s'agit d'un bassin versant aride du Maroc oriental. Il compte parmi les bassins les plus exposés à une pénurie d'eau qui pourrait s'amplifier à cause des changements climatiques futurs. Paradoxalement, l'orientation politique nationale a fait de l'agriculture en irriguée un moteur de croissance économique et un outil de la lutte contre la pauvreté rurale alors qu'elle est le grand consommateur des ressources en eau dans le pays. Face à cette situation paradoxale, la question de l'eau est devenue au cœur de la majorité des débats politiques et des préoccupations des pouvoirs publics nationaux. Une bonne gestion de l'eau commence par une bonne connaissance de cette ressource vitale, notamment son fonctionnement au sein d'un bassin hydrologique. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail de thèse qui vise à évaluer les impacts combinés de la variabilité climatique et de l'action anthropique sur les ressources en eaux dans le bassin versant de l'Oued Melloulou.

Pour cet objectif, nous avons adopté une approche méthodologique basée sur : 1) l'analyse temporelle des séries hydrométéorologiques afin de visualiser les différentes fluctuations, tendances et ruptures qui sont des signaux éventuels d'une amorce d'un changement du climat et des processus hydrologiques qui en découlent; 2) des campagnes de jaugeages sur le terrain dans le but d'établir une analyse plus précise sur l'organisation spatiale de l'écoulement de l'amont vers l'aval pendant les périodes d'indigence et des hautes eaux et de quantifier les rendements hydrologiques des principaux sous bassins; 3) les traitements des imageries satellitaires sont utilisés pour le suivi de l'évolution des terres agricoles irriguées entre 2000 et 2018; 4) une enquête de terrain selon un questionnaire destiné à la population locale a été élaboré dans la cadre d'un stage effectué à l'Université Le Mans (France) sous l'encadrement du Pr. Djellouli. Il a pour but de dégager, surtout, la perception des agriculteurs aux changements climatiques actuels et de leurs formes d'adaptation et de gestion des ressources en eau.

L'analyse des caractéristiques physiographiques montre que le bassin versant de l'oued Melloulou a une forme allongée avec une perméabilité qui varie de l'amont vers l'aval en fonction du degré d'influence des fissures et de karstification. La perméabilité est plus élevée en amont qu'en aval. La couverture végétative est généralement faible avec des superficies réduites des forêts qui sont denses à moyennement denses sur les sommets montagneux. Les pentes sont plus fortes dans la partie moyenne atlasique avec une diminution de l'énergie de relief vers l'aval. Il ressort alors que la réponse hydrologique du Melloulou dans sa globalité tend à être lente.

Sachant que le comportement hydrologique des bassins versants ne dépend pas uniquement des caractéristiques physiographiques, il est conditionné aussi par les conditions climatiques et leurs régimes de distribution spatiotemporelle. Dans ce contexte, le bassin versant de l'Oued Melloulou est caractérisé par une forte variabilité spatiotemporelle des précipitations avec une tendance généralisée vers l'augmentation. La significativité de cette tendance est très remarquable plus en aval qu'en amont. Il semble que cette augmentation a été enregistrée dans d'autres stations telles que ; Essaouira, Meknès, Errachidia, Ouarzazate, Oujda et Marrakech. La majorité de ces dernières stations s'installent sur des zones arides marocaines, (El Ajhar et al., 2018). Dans leur étude sur l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1960 – 2015), les auteurs de cette étude signalent également un retour remarquable de la pluviométrie à partir du début des années 2000. Par contre, ce constat est peut observé au niveau des régions subhumides (telles que Larache, Tanger et Tétouan). Ainsi, les tests statistiques appliqués sur les séries pluviométriques annuelles, au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou, montrent des ruptures datées vers le début des années 2000 et suivies par une augmentation de la pluviométrie.

L'analyse des séries pluviométriques mensuelles affiche une tendance significative vers l'augmentation en automne et une tendance vers la diminution en printemps sans qu'elle soit pour autant significative; elle touche plus particulièrement le mois d'avril. Les ruptures les plus significatives ont été observées également en automne. Un résultat similaire a été cité également par Sebbar et al (2012). Ces auteurs, traitant l'évolution des tendances pluviométriques annuelles et saisonnières de la région centrale du Maroc, ont montré un déclin des précipitations du cour et à la fin de saison (hiver et printemps) avec une légère

augmentation des précipitations d'automne. Ce déclin statistiquement significatif avoisine - 19 % en moyenne pour les précipitations annuelles sur l'ensemble de la région. Hanchane (2014) a cité aussi qu'il y a une tendance vers la diminution de la pluviométrie du mois de mars au niveau de la station de Taza (climat semi-aride).

Les températures moyennes annuelles enregistrées au niveau de la station de Guercif présentent une tendance statistiquement significative vers l'augmentation avec une rupture significative en 1993. Les séries estivales sont les plus touchées par cette augmentation, notamment au niveau des séries des températures moyennes maximales. Ces résultats coïncident avec les prévisions du GIEC dans un rapport publié en 2012. Les résultats obtenus dans ce rapport prévoient une augmentation probable des températures maximales. Le même résultat a été également signalé par Sebbar et al (2012).

L'analyse des séries d'évapotranspiration montre la même allure observée au niveau des séries des températures. Par ailleurs, l'estimation de l'ETP pour la station de Guercif affiche un déficit hydrique considérable toute l'année. Ces résultats témoignent du climat aride de la région orientale dont fait partie le bassin de l'Oued Melloulou.

L'analyse statistique des séries de débits montre quelques aspects de variation qui concordent avec ceux de la pluviométrie. En effet, la variabilité interannuelle des modules hydrologiques est très forte. C'est le point caractéristique de la majorité des cours d'eau méditerranéens (Obda, 2004). Ainsi, des fluctuations importantes interannuelles ont été observées avec un niveau élevé pendant les années déficitaires. Les tendances des modules interannuels sont généralement positives (tendance vers l'augmentation) sans qu'elles soient pour autant statistiquement significatives.

Le traitement des données hydrométriques extrêmes maximales montre une puissance de crues fortement élevée notamment en automne. L'analyse fréquentielle des débits journaliers maximaux affiche des valeurs estimées très hautes. Ce résultat est en accord avec celui trouvé par Obda (2004) au niveau du Haut Sebou. En plus, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) (2012), copatronné par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), prévoit également une augmentation de la fréquence des évènements

hydroclimatiques extrêmes dans les prochaines années qui touchera plus spécifiquement la région méditerranéenne.

Bien que le réseau des sources soit dense en amont, en plus de la présence du lac de Tameda qui jouent un rôle déterminant dans l'alimentation de l'écoulement souterrain, les débits d'étiage au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou sont très faibles et leur fréquence est haute, surtout en aval où l'Oued Melloulou s'assèche de mai à octobre. Cette sécheresse hydrologique se manifeste principalement en saisons d'été et d'automne pendant lesquels la demande climatique en vapeur d'eau est à son maximum. Ce déficit hydrologique contribue manifestement à l'apparition de conflits autour de l'eau entre la population de l'amont et celle de l'aval.

Les résultats de jaugeages réalisés sur le terrain montrent deux aspects hydrologiques différents: diminution du débit de l'amont vers l'aval au niveau de l'Oued Melloulou et son augmentation le long de l'Oued Zebzit, affluent principal de la rive droite de l'Oued Melloulou. Malgré la forte perméabilité des affleurements lithologiques au niveau du sous bassin de l'oued Zebzit, lehaussement du débit observé est expliqué, d'une part, par la contribution des sources qui se répartissent sur les berges de ce dernier et, d'autre part, par les faibles prélèvements d'eau pour l'irrigation. Par contre, le rôle des conditions climatiques et des prélèvements d'eau pour l'irrigation par la population sont très remarquables dans l'atténuation du débit d'écoulement le long de l'Oued Melloulou, surtout dans sa partie aval.

Les résultats de ce travail de thèse montrent également le rôle déterminant qu'ont joué l'Oued Melloulou et ses affluents dans la vie de la population locale. Ces cours d'eau représentent l'artère principale pour les activités agricoles et le moteur de l'économie locale. Au cours de cette dernière décennie, les apports pluviométriques et l'écoulement pérenne du cours d'eau ont fourni une occasion aux agriculteurs pour une expansion significative des terres agricoles sur le bassin. Cette expansion des terres agricoles exerce une pression conséquente sur les ressources en eau et perturbe ainsi le comportement hydrologique de l'Oued Melloulou. Cependant, cette pression sur la ressource en eau n'est pas similaire partout dans le bassin versant. En effet, il semble que les activités agricoles en irriguée sont faibles en amont, tandis qu'en aval, les terres agricoles irriguées sont en évolution accélérée d'une année à une autre. Par conséquent, la demande en eau dépasse la capacité de l'Oued

pendant la période des basses eaux. Face à cette pénurie en eau et avec l'apparition de l'énergie solaire utilisée pour le pompage, le recours aux eaux souterraines devient une solution efficace pour combler ce déficit. Ce mode d'irrigation est apparu pour la première fois au niveau des périmètres irrigués de Guercif et de Taddart. Par conséquent, plus de 80% des surfaces irriguées ajoutées au niveau du bassin versant de l'oued Melloulou pendant les 20 dernières années dépendent complètement des apports des nappes phréatiques. Ceci provoque une diminution remarquable, estimée d'environ 80 cm/an du niveau piézométrique des nappes locales, notamment celles du bassin de Guercif. Ce constat n'est pas un cas particulier dans le territoire marocain, mais c'est le cas de la majorité des réserves souterraines du pays ; Sous et Drâa (El Hassane et al., 2009), Sais (Rhoda et al., 2015), et Zagora (Bentaleb, 2011) sont des exemples éloquents.

Dans ce contexte, les précipitations dans les zones arides et semi arides limitent sans doute le développement agricole malgré l'existence d'importantes superficies en terrains cultivables. En revanche, le recours aux eaux souterraines constitue l'une des formes les plus fréquentes d'adaptation à la pénurie en eau superficielle dans la majorité des milieux arides et semi arides du monde. C'est le cas de la Californie et du nord du Mexique (Kauffer, 2012), des pays du Maghreb (Taabni et al., 2012), de l'Inde, (Mathy, 2015), de Jordan (Ray et al., 2012), d'Iran (Shahdany et al., 2018) et de la plaine de chine (Pan et al., 2015) ...

Les eaux souterraines, lorsqu'elles sont disponibles, peuvent augmenter la résilience et diminuer la vulnérabilité du secteur agricole face au problème de rareté de l'eau. Cependant, la FAO (2012) déclare que ces ressources qui sont moins vulnérables aux effets des changements climatiques, sont toujours face au risque de la surexploitation. En effet, on enregistre toujours une diminution des niveaux piézométriques des nappes en fonction d'une extension énorme des parcelles agricoles irriguées dépendantes totalement des eaux souterraines.

La gestion des ressources en eau ne se fait pas de la même façon au niveau de tout le bassin. En effet, la "Jmâa" constitue l'organisation traditionnelle chargée de gérer toutes les affaires des tribus en amont, y compris la ressource en eau. Ce mode de gestion ancien existait déjà chez toutes les tribus montagnardes du Maroc. Cependant, ce sont les Associations des

Usagers de l'Eau Agricole (AUEA) qui prennent la place de la "Jmâa" en aval du bassin versant de l'oued Melloulou pour la gestion de l'eau agricole.

Malgré un déficit hydrique récurrent au niveau de notre bassin, des crues violentes, lorsqu'elles surviennent, provoquent des inondations qui génèrent des dommages importants au niveau des terres agricoles sur les terrasses fluviales. Ces inondations produisent des pertes de produits agricoles par submersion lors de la période des crues, mais également des terres agricoles par le sapement des berges et la dynamique hydromorphologique du cours d'eau. D'après les interviews que nous avons réalisés sur le terrain, l'évolution accélérée des terres agricoles irriguées dans le bassin versant de l'oued Melloulou par les eaux souterraines présente une réponse probable à une augmentation de la fréquence des événements hydroclimatiques extrêmes. Les terrasses fluviales sont fortement vulnérables et faiblement résilientes aux écoulements extrêmes.

Cependant, le développement de la région n'est pas lié uniquement aux événements pluviométriques qui obéissent à des lois statistiques difficilement déchiffrable par l'Homme. Par ailleurs, la perception climatique de ce dernier lui confère la capacité d'innover et de s'adapter et surtout d'optimiser et d'économiser la ressource en eau.

Finalement, malgré l'effort fournit dans cette étude, le manque d'une bonne couverture spatiotemporelle du territoire en stations hydrométéorologiques, la difficulté d'accès à certaines zones du terrain d'étude, le manque de communication de la part des responsables administratifs de l'ensembles des services liés à l'eau et le coût financier des travaux de terrain ont limité malheureusement les résultats de cette étude.

Ainsi, plusieurs questions affleurent mais restent sans réponses. Il s'agit:

- De l'estimation de la contribution de la couverture neigeuse dans l'alimentation des cours d'eau du bassin versant ;
- Des effets probables du barrage de Targa Oumadi, en phase de construction, sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant, sur les ressources en eau dans la région orientale en générale et sur le paysage agricole futur ;

- De la durée de vie des nappes phréatiques locales dans un contexte caractérisé par les subventions étatiques pour la création des terres agricoles, d'une part, et par un changement climatique global, d'autre part ;

- De développer une connaissance plus approfondie sur les pertes en eau par l'évapotranspiration dans cette région où la demande climatique est élevée et qui dépendante non seulement des températures élevées, mais également de vents et d'une humidité relative faible.

En fin, notre étude ouvre également une perspective de recherche pour le climat futur. En effet, les particularités géographiques de la zone d'étude, marquées par son enclavement par les chaînes montagneuses, rend cette prévision à long terme, basée sur les modèles climatiques globaux, très difficile. D'où la nécessité d'aborder cette question du climat futur de la région en se basant sur les méthodes de descente d'échelle comme cela a été réalisé dans de nombreuses régions.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Abdelaziz L. (2009). Cartographie des pluies annuelles dans le bassin versant de l'oued Seybouse (Nord-Est algérien), *Sciences & Technologie*, 30, 43-52.
- Adeloye A J & Montaseri M. (2002). Preliminary streamflow data analyses prior to water resources planning study / Analyses préliminaires des données de débit en vue d'une étude de planification des ressources en eau, *Hydrological Sciences Journal*, 47:5, 679-692, DOI: 10.1080/02626660209492973.
- Afkir E. (1985). Le bassin-versant de l'Inaouene : caractéristiques climatiques et comportement hydrologique. Contribution à une connaissance climato-hydrologique d'un bassin-versant méditerranéen. Th. 3ème cycle, Toulouse le Mirail.
- Akdim B., Laouane M., Obda K., Tribak A. (2004). Réflexion sur la cartographie du risque hydrologique dans le bassin versant de l'Oued Larbaa, en amont de Taza (Maroc) : spatialisation et valeur des données ponctuelles, in: *Spatialisation et cartographie en hydrologie*, Metz, Edition université Paul Verlaine, 231-244.
- Albergel J & Claude J. (2001). Sécheresse et gestion des ressources en cas de pénurie dans les pays du Sud et de l'Est du bassin méditerranéen. In *Séminaire Int. "Hydrologie des Régions*.
- Albergel J., Nasri N., Boufaroua M & Pépin Y. (2001). Bilan de l'érosion sur les petits bassins versants des lacs eollinaires de la dorsale tunisienne. *l'rl/-v Documents Techniques en hydrologie* 51, 63-70.
- Amoussou E. (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire sédimentaire du bassin du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat. Université de Bourgogne.
- Amyay M., Ghaoui S., Obda Kh., Zhimi M. (2013). Impact des mutations de l'occupation du sol dans le moyen atlas sur la turbidité des eaux de la source de Bittit. Actes du Deuxième Colloque international « Eau & Climat : Regards croisés Nord/Sud », Fès (Maroc), 27-28 pp.
- Ansoumana B., Dacosta H., & Alain D. (2011). Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Physio-Géo*. 107-124. 10.4000/physio-geo.1958.
- Assani A A., Lajoie F & Laliberté C. (2007). Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20 (1), 127-146.
- Aziz Bentaleb, « Pompage de l'eau et désertification dans la Vallée du Draâ moyen : cas de la palmeraie de Mezguita (Maroc) », *Insaniyat / إنسانيات*, 51-52 | 2011, 65-81.
- Baba Hamed K & Bouanani A. (2016). Caractérisation d'un bassin versant par l'analyse statistique des paramètres morphométriques : Cas du bassin versant de la Tafna. (Nord-ouest algérien). *Geo-Eco-Trop.*, 2016, 40, 4 : 277-286.
- Baba Hamed K. (2007). Hydrodynamique et modélisation d'une nappe alluviale, validation par l'approche géostatistique. Application à la nappe de la plaine de Maghnia (NW Algérien). Thèse Doctorat. Es Sciences. Univ, Tlemcen., 192p.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Bagnouls F & Gaussen H. (1952). Les climats biologiques et leur classification, *Ann. de Géog.*, n° 288.
- Bagnouls F & Gaussen H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse* 88: 193-239.
- Bahir M., Mennani M., Jalal M & Fakir Y. (2002). Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la ville d'Essaouira (Mogador, Maroc). *Sécheresse*, 13, 13-19.
- Batisani N & Yarnal B. (2010). Rainfall variability and trends in semi-arid Botswana: Implications for climate change adaptation policy. *Applied Geography*. 30. 483-489. 10.1016/j.apgeog.2009.10.007.
- Bedoum A., Biona C B., Bell J P., Adoum I., Mbiake R & Baohoutou L. (2017). Évolution des indices des extrêmes climatiques en République du Tchad de 1960 à 2008, *Atmosphere-Ocean*, 55:1, 42-56, DOI: 10.1080/07055900.2016.1268995
- Ben Brahim Y. (2009). La neige dans la commune de Maghraoua et son pourtour (Moyen Atlas Septentrional) : présentation et interprétation des données préliminaires et potentialités du développement local. *Rev Géomaghrif*, n°9. pp 61-69.
- Ben Jmaa H. (2007). Dynamique morphologique de l'Oued Mlames (Tunisie centrale). *Sécheresse* 2007 ; 18 (3) : 207-11.
- Bendjoudi H & Hubert P. (2002). Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47(6) décembre 2002.
- Benzougagh B., Boudad L., Dridri A & Sdkaoui D. (2016). Utilisation du SIG dans l'analyse morphométrique Et La priorisation des sous-bassins versants de Oued Inaouene (Nord-Est Du Maroc). *European Scientific Journal*. vol.12, No.6. P 266-289.
- Benzougagh B., Dridri A., Boudad. L., Sdkaoui D. (2016). Utilisation du SIG dans l'analyse morphométrique et la priorisation des sous-bassins versants de l'Oued Inaouène (nord-est du Maroc). *European Scientific Journal* Février 2016 édition vol.12, No.4 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.
- Bois Ph. (1971). Une méthode de contrôle de séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie. Publication du Laboratoire de Mécanique des Fluides. Université de Grenoble I (mai 1971), 30p.
- Bois Ph. (1986). Contrôle de séries chronologiques corrélées par l'étude du cumul des résidus de la corrélation. Colloque 2è\_\_ journées Hydrologiques d'ORSTOM, sept. 1986, Montpellier, 89-98.
- Brunet-moret Y. (1971). Etude de l'Homogénéité des Séries Chronologiques des
- Buishand T A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *J. Hydrol*, 58, 11-27.
- Buishand T A. (1984). Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *J. Hydrol*, 73, 51-69.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Capot-Rey R. (1951). Une carte de l'indice d'aridité au Sahara français (Bull. de l'Ass. Des Géogr. français, p. 73-76.
- Carbonnel J P & Hubert P. (1994). Etude statistique de quelques séries roumaines et bulgares. Indices sur l'évolution climatique récente. Romanian Journal of Hydrology & Water Resources, 1(2), pp 107-113.
- Changnon S A & Kunkel K E. (1995). Climate-related fluctuation in Midwestern floods during 1921–1985. J. Water Resour. Plan. Manage. 121(4), 326–334.
- Charlton R. (2008). Fundamentals of fluvial geomorphology. Routledge. Abingdon. 234 pp.
- Cheng L., AghaKouchak A., Gilleland E., & Katz R W. (2014). Non-stationary extreme value analysis in a changing climate. Climatic Change, 127, 353–369.
- Claude J. (1998). La gestion de la ressource en eau en zones arides : contraintes naturelles et socio-économique et programmes d'action. Rev : Revue de l'INAT, Numéro Spécial 1998 - Centenaire de l'INAT, Séminaire <<Ressources naturelles>>.
- Coles S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer, London.
- Dacharry M. (1996). Dictionnaire français d'hydrologie,
- DE Martonne E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique : l'indice d'aridité. La Météorologie, 2, 449-458.
- Delus C L. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 571, mis en ligne le 30 novembre 2011.
- Depret T. (2014). Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher. Thèse de Doctorat. Université Paris 1, Paris.
- Douglas E M., Vogel R M & Kroll C N. (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. Journal of Hydrology. Volume 240. P 90–105.
- Douglas E M., Vogel R M & Kroll C N. (2000). Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. Journal of Hydrology 240 (2000) 90-105.
- Douvinet J. (2008). Les bassins versants sensibles aux "crues rapides" dans le Bassin Parisien - Analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Thèse de doctorat. Université De Caen Basse-Normandie France.
- Driouech F. (2010). Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat, Univ. Toulouse, France, 163 p.
- Driouech F., Ben Rached S & El Hairech T. (2013). Climate variability and change in North African countries. Dans : Climate change and food security in West Asia and North Africa. Sivakumar M.V.K., R. Lal, R. Selvaraju Et I. Hamdan (éd.), Springer, Chap. 9, pp.161-172.
- Dubief J. (1950). Evaporation et coefficients climatiques au Sahara, Trav. de l'Institut de Recherches Sahariennes, t. VI. p. 13-44.
- Duvall A., Kirby E & Burbank D. (2004). Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles. *Journal of Geophysical Research*, vol. 109

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Duvall A., Kirby E & Burbank D. (2004). Tectonic and lithologic controls on bedrock channel profiles. *Journal of Geophysical Research*, vol. 109.
- El Ajhar L., El Khachine D., El Bakouri A., El Kharrim K & Belghyti D. (2018). Evolution de la pluviométrie de 1960 à 2015 au Maroc. *International Journal Of Research Science & Management*. 5(10) pp 47-56.
- El Fellah B. (1994). Guelta Tamda (Moyen Atlas plissé, Maroc) ; un exemple de lac de barrage naturel. *Revue de Géographie du Maroc*.
- El Ghachi M. (2007). La Seille : Un système fluvial anthropisé (Lorraine, France). Thèse de doctorat, Metz.
- El Hassane E M., Lekbir O., Lhoussaine B & Houria T S. (2013). Politique de gestion des ressources en eau et équité hydraulique *Cas des bassins du Souss et du Dra (Sud marocain)*. IRD Éditions. Pp 127-150.
- El Meddahi Y. (2016). Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff. Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali – Chlef.
- El Meddahi Y. (2016). Les changements climatiques et leurs impacts sur les ressources en eau, cas du bassin du Cheliff. Thèse de doctorat. Université Hassiba Ben Bouali – Chlef. Algérie.
- Emberger L. (1931). Sur la formule climatique applicable en géographie botanique. *Compt. Rend. Séances Acad. Sci.* 191 : 389-390
- Emberger L. (1955). Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sc de Montpellier* 7: 3-43.
- Falkenmark M. (1989). The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed? *Ambio*, 18(2), 112-118.
- Faye C. (2014). Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal. *Cinq Continents*, 4 (10) : 80-108.
- Feidas H., Nouloupoulou C H., Makrogiannis T & Bora-Senta E. (2007). Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data: 1955–2001. *Theor. Appl. Climatol.* 87, 155–177.
- Floret C & Pontanier R. (1984). Aridité climatique, aridité édaphique. *Bull. Soc. Bot. Fr.*, 131, Actual. Bot. 2/3/4, 265-275.
- Fossou R K., Ziegler D., Zézé A., Barja F & Perret X. (2016). Two major clades of bradyrhizobia dominate symbiotic interactions with pigeonpea in fields of Côte d'Ivoire. *Front. Microbiol.* 7.
- Frich, P., L. V. Alexander, P. Della-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A. M. G. Klein Tank, and T. Peterson (2002), Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century, *Clim. Res.*, 19, 193– 212.
- Garcia P F. (2016). Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Thèse de doctorat en Hydrologie. Université Pierre et Marie Curie.
- Gausson H. (1952). Les résineux de l'Afrique du nord. *Ecologie et reboisement. Revue internationale de botanique appliquée et d'agriculture tropicale*. N° 361-362.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Ghabri M. (2016). Etude des crues et de transport sédimentaire associée : application au bassin versant de la Medjerda. Thèse de doctorat. Université de Toulouse.
- Gilles G. (2004). Introduction à la géostatistique, Ed. Institut National Agronomique de Paris-Grignon, Paris, 34 p.
- Gilles P. (2004). « Hommage à David Woodward », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Cartographie, Imagerie, SIG, mis en ligne le 16 décembre 2004.
- Giret A. (2007). Le risque hydrologique : du concept à sa gestion. Éditions Le Manuscrit, Paris, 249 p.
- Gocic M & Trajkovic S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia, *Rev; Global and Planetary Change*, Volume 100, 2013, P 172-182.
- Gocic M & Trajkovic S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. *Rev Global and Planetary Change*. Volume 100 .P 172-182.
- Gratton Y. (2002). Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, Juin 2002.
- Gravelius H. (1914) Grundriss der gesamten Gewässerkunde, Band 1: flubkunde (Compendium of Hydrology ?, vol. 1: Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany.
- Groupe Chadule. (1987). Initiation aux pratiques statistiques en géographie. Paris, Masson (Coll. Géographie), 189 p.
- Groupe D'experts Intergouvernemental Sur L'évolution Du Climat (GIEC). (2013). Changements climatiques 2013 : les éléments scientifiques. Résumé à l'intention des décideurs. GIEC, Suisse, 34 p.
- Hanchane M. (2016). Régionalisation climatique en milieu montagnard selon les régimes pluviométriques mensuels : cas du Moyen Atlas Oriental (sud de Taza). *Rev. Géo. « Espaces »*. N° 2 et 3. 47-60.
- Hasbaia M & Adoui H. (2015). Contribution à l'étude du régime des crues dans les bassins semi-arides Algériens : cas du bassin versant du Hodna. International Conference on African Large River Basins Hydrology. Hammamet, Tunisia, October, 26-30th, 2015
- Hasbaia M & Halima A. (2015). Contribution à l'étude du régime des crues dans les bassins semi-arides algériens. Cas du bassin versant du Hodna. Conférence Internationale Sur L'hydrologie Des Grands Bassins Fluviaux De L'Afrique At: Hammamet-Tunisie. Volume: 2015
- Holbrook J & Schumm S A. (1999). Geomorphic and sedimentary response of rivers to active deformation: a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, vol. 305, n° 1-3, p. 287-306.
- Horton R E. (1932). Drainage basin characteristics. *Trans Am Geophys Union* 13:350–361
- Horton R E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins. Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol Soc Am Bull* 56(3):275–370
- <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexdic.htm>

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

Huang S., Li P., Huang Q., Leng G., Hou B & Ma L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors, *Journal of Hydrology*, Volume 547, 2017, P 184-195,

Hubert P., Carbonnel J.P., & Chaouche A., 1989 : Segmentation des séries hydrométéorologiques - Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, pp 349-367.

Ibiate A. (2004). Las crecidas fluviales en el Zadorra: procesos, riesgos y propuestas de ordenación. Tesis doctoral. 630 pp. + anexo cartográfico. Inédito.

Idrissi S. (2019). Géomorphologie fluviale et anthropisation dans la vallée du Beht (Bassin du Sebou). Thèse de doctorat. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah.

IPCC (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. Special report of the intergovernmental panel on climate change.

IRD (1998) : Khronostat, Logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques. ORSTOM Ed. Paris. <http://www.hydrosciences.org/spip.php?article239>.

Isnard H. (1957). La répartition saisonnière des pluies au Maroc, *Annales de Géographie*, Volume 67 (359), 39-42.

Jena S K & Tiwari K N. (2006). Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. *Journal of Hydrology*, 319, pp. 1–14.

Joly, F. (2006). Les eaux sauvages des régions arides. Notions de base sur l'hydrologie des déserts. *Rev Géomorphologie : relief, processus, environnement* [En ligne], vol. 12 - n° 4 | 2006, mis en ligne le 01 janvier 2009,

Katz R W. (1996). Use of conditional stochastic models to generate climate change scenarios, *Clim. Change.*, 32(3), 237 – 255.

Katz R W., Parlange M B., & Naveau P. (2002). Statistics of extremes in hydrology, *Adv. Water Resour.*, 25, 1287 – 1304.

Kauffer E. (2012). « Des négociations internationales aux stratégies locales », *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement* [Online], 14-15 | 2012, Online since 01 July 2014.

Kébré M B. (2013). Gestion des Ressources en Eau dans les Régions Arides : Analyse Expérimentale d'un Sol Type du Burkina Faso et Modélisation Numérique des Transferts d'Eau. Thèse de Doctorat en Génie civil. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Kébré M B. (2013). Gestion des Ressources en Eau dans les Régions Arides : Analyse Expérimentale d'un Sol Type du Burkina Faso et Modélisation Numérique des Transferts d'Eau. Thèse de doctorat. Université Montpellier 2 Co-tutelle avec l'Université de Ouagadougou (Burkina Faso).

Kendall M G. (1975). Rank Correlation Methods. 4th Edition Charles Griffin. London, 202p.

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, 218 p.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

Kingumbi A., Bergaoui Z., Bourges J., Hubert P & Kallel R., (2000), In : Servat E., Albergel J., (2001), Hydrologie des régions méditerranéennes, UNESCO ; IRD, Séminaire International, Montpellier (FRA), p. 341-350

Kisi O & Ay M. (2014). Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*. Volume 513. P 362-375.

Kisi O & Murat A. (2014). Comparison of Mann–Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey. *Journal of Hydrology*. Volume 513, P 362-375.

Kouri L & Gomer D. (2010). Analyse des processus de ravinement et détermination de la sensibilité des terrains marneux dans le Tell oranais (Algérie). *Sécheresse* 2010 ; 21 (4) : 257-65

Laabidi A., El Hmaid A., Gourari L & El Abassi M. (2016). Apports du modèle numérique de terrain MNT a la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin versant du moyen Beht en amont du barrage El kansera (sillon sud rifain, Maroc). *European Scientific Journal*. vol.12, No.29. P 258-288.

Lambert R. (1996). Géographie du cycle de l'eau, Editions Presses Universitaires du Mirail (PUM), Toulouse, 439 p.

Langbein W B. (1947). Topographic Characteristics of Drainage Basins. USGS Water Supply Paper, 947-C. 157 p.

Langbein W B. (1964). Profiles of rivers of uniform discharge. United States Geological Survey Professional Paper, n° 501-B, p. 119-122

Larue J P. (2014). Profils longitudinaux et ruptures de pente : enseignements géomorphologiques en Bretagne du sud », *Physio-Géo*, Volume 8 | -1, 49-65.

Lasri M. (2015). Les inondations menaçant l'agglomération de Fès : De l'étude hydrologique et du risque à la cartographie des dangers d'inondation. Thèse de doctorat. Université Sidi Mohamed Ben Abdellah et Université de Lausanne

Leadbetter M R., Lindgren G., & Rootzen H. (1983). *Extremes and Related Properties of Random Sequences and Processes*, Springer-Verlag, New York.

Lebourgeois F & Piedallu C. (2005). Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Rev. For. Fr.* LVII – 4: 331- 356.

Lee A F S & Heghinian S M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables – A Bayesian approach. *Technometrics*, 19 (4), 503-506.

Lettenmaier D P., Wood E F & Wallis J R. (1994). Hydro-climatological trends in the continental United States, 1948– 88. *J. Climate* 7, 586–607.

Lettenmayer D. (1976). Detection of trends in water quality data from records with dependant observation. *Water resources research*, Vol.12, Issue 5, pp.1037- 1046.

Liébault F., Clément P., Piégay H., Rogers C.F., Kondolf G.M & Landon N. (2002). Contemporary channel changes in the Eygues basin, southern French Prealps: the

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- relationship of sub-basin variability to watershed characteristics. *Geomorphology*, 45, pp. 53-66.
- Lins H F & Slack J R. (1999). Streamflow trends in the United States. *Geophys. Res. Lett.* 26, 227–230.
- Llamas J. (1993). *Hydrologie générale. Principes et application*, Editions Gaétan Morin, Québec, 2ème édition, 527 p.
- Mann H B. (1945). Non-parametric Tests against Trend. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Margat J. (2008). *L'eau des Méditerranéennes situations et perspectives*. Éd. L'Harmattan. Paris, 288 p.
- Martin J. (1975). *Alimentation en eau des périmètres de Guercif et Taddart. Etude hydrologique du projet de renforcement des prélèvements d'eau dans l'O. Melloulou*. D.R.E., Rabat. (Rapport inédit). Cité par Mouhdi (1993).
- Mathy, S. (2015). Des négociations internationales aux politiques nationales : le positionnement ambivalent de l'Inde sur le changement climatique. *Mondes en développement*, 1(1), 139-160. <https://doi.org/10.3917/med.169.0139>.
- Mattin J L. (1994). *Calcul de la lame d'eau précipitée sur le bassin versant de l'Oubangui a Mongoumba (1972-1992)*. Mémoire de maitrise en géographie. Université de Bangui. République de Centrafrique.
- Mayomi I., Yelwa M H & Abdussalam B. (2018). Geospatial analysis of morphometric characteristics of river Hawul basin, North-East Nigeria. *Resources and Environment* 2018, 8(3): 103-126
- Meylan P., Favre A C., & Musy A. (2008). *Hydrologie fréquentielle: une science prédictive*. PPUR presses polytechniques.
- Miller V C. (1953). *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee*, Columbia, Columbia University Department of Geology, Technical Report, 3.
- Mokhtari N., Mrabet R., Lebailly P & Bock L. (2014). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*. Vol. 2 N°1.
- Mokhtari N., Mrabet R., Lebailly P & Bock. L (2014). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* (2014) 2 (1) :50-66.
- Moraes J M., Pellegrino G Q., Ballester M V et al. (1998). Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. *Water Resources Management* 12, 295–311 (1998). <https://doi.org/10.1023/A:1008048212420>
- Mouhdi A. (1993). *Contribution A l'étude pluvio-hydrologique du bassin-versant de l'Oued Melloulou. (Maroc oriental)*. Thèse de doctorat. Université Des Sciences Et Technologies De Lille U.F.R. De Géographie Et D'aménagement Spatial.
- Moussa R., Bocquillon C. (1996). Fractal analysis of tree-like channel networks from digital elevation model data. *Journal of hydrology*, 187, pp.157-172.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Mukhopadhaya S. (2016). Rainfall Mapping using Ordinary Kriging Technique: Case Study: Tunisia. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*. Volume 3. 2350-77.
- Obda Kh. (1991). Etude hydrologique de l'oued Nekor (Rif) : Précipitations, écoulement et gestion des ressources en eau. Thèse de doctorat, Université de Nancy 2.
- Obda Kh. (2004). Indigences extrêmes des écoulements des oueds méditerranéens : cas des Oueds Nekor au Rif et du Haut Sebou au Moyen Atlas. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc 422p +15anexes.
- Obda Kh., Gille E & Akdim B. (2000). Application de la méthodologie des profils hydrologiques dans la gestion des ressources en eau : cas des oueds zlou (Moyen Atlas Septentrional) et Nekor (Rif Central). In *Mosella 2000*, t. xxv, n°3-4, pp. 109-120.
- Obda Kh., Nejari A., & Devos A. (2000). Spatialisations des débits d'étiages du Haut Sebou (Moyen Atlas) aspects méthodologiques et ressources en eau", *Mosella -tome XXV n° 3-4*, PP.121-138.
- Obda Kh., Taous A., Amyay M & Lasri M. (2017). Hydrologie du Saiss-Fès : d'un hydrosystème riche, régulier et pondère à un milieu menacé par les inondations et la pénurie en eau. *Travaux du Laboratoire d'Analyse Géoenvironnementales et d'Aménagement-Développement Durable*. Publication de la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Maroc. 31-46 pp.
- Obda Kh., Taous A., Sabaoui A & Amyay M. (2009). Hydrologie du Haut Melloulou (Moyen Atlas Nord Oriental). *Rev Géomaghib*, n°5, pp 89-102.
- Olsen J R., Stedinger J R., Matalas N C & Stakhiv E Z. (1999). Climate variability and flood frequency estimation for the upper Mississippi and lower Missouri rivers. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 35(6), 1509–1520.
- OMM (Organisation Météorologique Mondiale). (1996). Guide des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. Publication OMM n°168. Genève Suisse.
- Onyutha C & Willems. P. (2015). Spatial and temporal variability of rainfall in the Nile Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19. 2227–2246. 10.5194/hess-19-2227-2015.
- Ouarda T B M J., Charron C., Niranjan K., Marpu P R., Ghedira H A., Molini A & Khayal I. (2014). Evolution of the rainfall regime in the United Arab Emirates. *Journal of Hydrology* 514, 258–270.
- Ouhamdouch S., Bahir M & Carreira P. (2018). Impact du changement climatique sur la ressource en eau en milieu semi-aride : exemple du bassin d'Essaouira (Maroc). *Rev des sciences de l'eau*. Volume 31, Numéro 1, 2018, p. 13–27.
- Pan J., Zheng Y & Markandya A. (2015). Adaptation Approaches to Climate Change in China: An Analytical Framework. *Asia and the World Economy*, 243–256. doi:10.1142/9789814578622\_0032
- Pande B & Al-Mashidani G. (1978). A technique for the determination of areal average rainfall. *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*, 23, 4, 12/1978.
- Pardé M. (1949). *Potamologie : Hydrologie fluviale*. Université de Grenoble, édition 2, 158p.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Pardé M. (1964). Quelques données sur des crues remarquables en diverses contrées et sur le bilan de leurs écoulements. Brochure de géographie physique, Genève, 20 p.
- Partal T & Küçük M. (2006). Long-term trend analysis using discrete wavelet components of annual precipitations measurements in Marmara region (Turkey). *Physics and Chemistry of The Earth - Phys Chem Earth*. 31. 1189-1200. 10.1016/j.pce.2006.04.043.
- Paturel J E., Servat E., Kouamé B., Lubès H., Quedraogo M & Mason J M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part II: An integrated regional approach. *J. Hydrol.* 191, 16–36.
- Peguy Ch P. (1942). Principes de morphométrie alpine. *Revue Géographique Alpine*, 2, pp. 453-486.
- Perreault L., Bernier J., Bobée B & Parent E. (2000a). Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 1: The normal model revisited. *J. Hydrol.* 235, 221–241.
- Perreault L., Bernier J., Bobée B & Parent E. (2000b). Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 2: Comparison of change-point models and forecasting. *J. Hydrol.* 235, 242–263.
- Perreault L., Haché M., Slivitsky M. & Bobée B. (1999). Detection of changes in precipitation and runoff over eastern Canada and US using a Bayesian approach. *Stochastic Environ. Res. Risk Assessment* 13, 201–216.
- Peterson T C., Folland C., Gruza G., Hogg W., Mokssit A & Plummer N. (2001). Report on the activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998 – 2001, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071, 143 pp., World Meteorol. Org., Geneva.
- Peterson, T. C., et al. (2002), Recent changes in climate extremes in the Caribbean region, *J. Geophys. Res.*, 107(D21), 4601, doi:10.1029/ 2002JD002251.
- Pettitt A N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-point. Problem. *Applied Statistics*, 28 N°2, 126-135.
- Précipitations annuelles par la Méthode des Doubles Masse. » In Cah. O.R.S.T.O.M. Vol.II n°3, Paris, pp. 147-165.
- Pupacko A. (1993). Variations in northern Sierra Nevada streamflow: implications of climate change. *Water Resour. Bull.* 29(2), 283–290.
- Qadem A. (2015). Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du Haut Sebou (Maroc). Thèse de doctorat. Université Sidi Mohamed ben Abdellah Fès et Université de Lorraine (Metz).
- Ray P A., Kirshen P H & Watkins D W. (2012). Staged Climate Change Adaptation Planning for Water Supply in Amman, Jordan. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 138(5), 403–411. doi:10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000172.
- Réméniéras R. (1986). *Hydrologie de l'ingénieur*. Editions Eyrolles, Paris, 456 p.
- Rhoda F., Marcel K & Olivier P. (2015). Hybridation des règles d'accès à l'eau souterraine dans le Saiss (Maroc) : entre anarchie et Léviathan ?. *Journals Openedition, Études rurales*, 196 127-150.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Rocha N P. (2014). Débits de crue et analyse hydrologique de petits bassins versants. Mémoire Maîtrise en génie agroalimentaire. Université Laval Canada.
- Roche M. (1963). Hydrologie de surface, Gauthier-Villars éditeur. Paris, 431p.
- Roche M. (1986). Dictionnaire français d'hydrologie de surface : <https://www.cpepesc.org/Le-dictionnaire-d-hydrologie-en.html>
- Saadi Z & Fedan B. (1999)a. Les tidalites liasiques du Moyen Atlas méridional, de Boumia-Aghbalou N'Serdane et de Taddammout-Mibladène. Marqueurs de l'évolution du paléoseuil de la Haute Moulouya. 1er Colloque sur le Jurassique marocain, 28 et 29 septembre, Rabat, 118-119.
- Saadi Z & Fedan B. (1999)b. Les dépôts triasico-liasiques de la Haute Moulouya et du Moyen Atlas : typologie, caractérisation et signification géodynamique. Deuxième Réunion du Groupe Marocain du Permien et du Trias, Marrakech, 24-26 novembre 1999, p. 40.
- Saam M. (1998). Analyse SIG et caractérisation écologique des bassins versants de petits plans d'eau en relation avec leur biodiversité. Mémoire de maîtrise, LEBA, Université de Genève, 143 p.
- Sabaoui A & Villard P. (1987). Fractures majeures et décollement de couverture dans le Moyen Atlas septentrional (sud-ouest de Taza, Maroc). In C.R. Acad. Sc., 305, série 2, Paris, pp. 993-998.
- Sabaoui A. & Villard P. (1987). Fractures majeures et décollement de couverture dans le Moyen Atlas septentrional (sud-ouest de Taza, Maroc). In C.R. Acad. Sc., 305, série 2, Paris, pp. 993-998.
- Sabaoui A. (1998). Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen-Atlas septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel- Ribat Al Khayr- Bouiblanc. Th. De Doct. D'Etat, Université Mohamed V., Rabat, 432p.
- Scheffé H. (1959). The analysis of variance. Wiley ed, New-York, 447p.
- Schmidt J & Dikau R. (2000). Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models -Semantics, methods, future needs. In DIKAU R., SAURER H. (eds.) - GIS for Earth Surface Systems – Analysis and Modelling of the Natural Environment. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 153-173,
- Schumm S A. (1956). Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. Geol Soc Am Bull 67:597–646
- Schumm S A. (1977). The fluvial system. Wiley, New York, p 338
- Sebbar A. (2013). Etude de la variabilité et de l'évolution de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte des précipitations. Thèse de doctorat. Université Hassan II Mohammedia – Casablanca.
- Sebbar A., Badri W., Fougrach H., Hsaine M., & Saloui A. (2011). Étude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). Sécheresse, 22, (3), 139-148.
- Sebbar A., Hsaine M., Fougrach H & Wadi B. (2012). Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. Actes du XXVème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble 2012. Volume: (1) 709 – 714.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Sen P K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J. Am. Stat. Assoc.* 63(324), 1379–1389.
- Serrat P & Depraetere C. (1997). Incidences de facteurs géomorphologiques dans le fonctionnement d'un bassin en situation de crue : l'exemple de l'Agly (Pyrénées Orientales). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, pp. 73-88.
- Servat E & Mahé G. (2009). Eau et zones arides : enjeux et complexité. *Rev : Sécheresse*. 20. 007-008. 10.1684/sec.2009.0179.
- Servat E., Paturel J E., Lubès H., Kouamé B., Quedraogo M & Mason J M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea. Part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *J. Hydrol.* 191, 1–15.
- Shahdany H S M., Firoozfar A., Maestre J M., Mallakpour I., Taghvaeian S & Karimi P. (2018). Operational performance improvements in irrigation canals to overcome groundwater overexploitation. *Agricultural Water Management*, 204, 234-246. doi:10.1016/j.agwat.2018.04.014
- Siame L., Bellier O & Sebrier M. (2006). Active tectonics in the Argentine Precordillera and western Sierras Pampeanas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 61:604–619
- Sirtou M. (1995). Etude hydroclimatologique des bassins de N'fis, du Rhraya, de l'Ourika et du Zat (Maroc). Thèse de doctorat. Université de Metz.
- Smakhtin V. (2001). Low Flow Hydrology: A Review. *Journal of Hydrology*. 240. 147-186. 10.1016/S0022-1694(00)00340-1.
- Smith K & Richman M B. (1993). Recent hydroclimatic fluctuations and their effects on water resources in Illinois. *Climatic Change* 24, 249–269.
- Smith K G. (1950). Standards for grading texture of erosional topography. *Am. J. Sci.* 248:655-668.
- Sneyers R. (1975). Sur l'analyse statistique des séries d'observations. Note technique de l'OMM n°143.
- Soro T D., Soro N., Oga Y M S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K E & Biémi J. (2011). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo*, Volume 5-1, 55-73.
- Souanef N. (2015). Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister en : Hydraulique. Université Mohamed Khider – Biskra.
- Soumendu C., Dipak B & Ansar K. (2014). Detection of Approximate Potential Trend Turning Points in Temperature Time Series (1941-2010) for Asansol Weather Observation Station, West Bengal, India. *Atmospheric and Climate Sciences*, 4, 64-69.
- Strahler A N. (1950). Equilibrium theory of erosional slopes approached by frequency distribution analyses. *Am. J. Sci.* 248:673-696, 800- 814.
- Strahler A N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bull. Geol. Am.* 63:1117-1142

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

- Strahler A N. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks. In: Chow VT (ed) Handbook of applied hydrology. McGraw Hill, New York, pp 4–76
- Taabni M & El Jihad M-D. (2012). "Eau et changement climatique au Maghreb : quelles stratégies d'adaptation ?", *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 260 | 2012, 493-518.
- Taesombat W & Sriwongsitanon N. (2009). Areal rainfall estimation using spatial interpolation techniques. *ScienceAsia*. 35. 10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.268.
- Taous A. (2005). Géomorphodynamique fluviale ; processus morpho sédimentaires, ajustements spatio-temporels, paléo environnements et mutations des espaces fluviaux. Pub ; FLSH Sais Fès, série : thèses et monographies, n° 11, 425p.
- Taylor R G., Doell P., Scanion B R et Rodell M. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*. Vol 3, 322-329.
- Thornthwaite C W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographic Review* 38: 55- 94.
- Touazi M., Bhiry N., Laborde J-P & Achour F. (2011). Régionalisation des débits moyens mensuels en Algérie du nord. *Revue des sciences de l'eau*. 24. 177. 10.7202/1006110ar.
- Waqas M., Luqman M & Sanaullah M. (2017). Assessment and extraction of hydrological parameters of Munda Dam watershed – a geospatial approach. *Science international-Lahore*. 29. 867-873.
- Ward R C. (1975). Principles of Hydrology. McGraw-Hill, New York, USA.
- Washington R., Harrison M., Conway D., Black E., Challinor A., Grimes D., Jones R., Andy M., Kay G., & Todd M. (2006). African climate change: taking the Shorter Route. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 87, N° 10. 1355-1366.
- Wilcoxa C., Vischela T., Panthoua G., Bodianb A., Blancheta J., Descroixd L., Quantina G., Casséc C., Tanimoune B & Konee S. (2018). Trends in hydrological extremes in the Senegal and Niger Rivers. *Journal of Hydrology* 566 (2018) 531–545.
- Wisler C O & Brater E F. (1959). Hydrology. John Wiley, Chichester, West Sussex, UK.
- Yao J., Wang P., Wang G., Shrestha S., Xue B & Sun W. (2020). Establishing a time series trend structure model to mine potential hydrological information from hydrometeorological time series data. *Science of the Total Environment*. Volume 698,
- Zeryouhi L. (1970). Etude géologique et hydrogéologique de la partie NE du Moyen Atlas plissé et la moyenne Moulouya inférieure. Th. de 3ème cycle, Montpellier.
- Zhang X., Harvey K D., Hogg W D & Yuzyk T R. (2001). Trends in Canadian streamflow. *Water Resour. Res.* 37(4), 987–998.
- Zhang, X & Zwiers F W. (2004), Comment on "Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test" by Sheng Yue and Chun Yuan Wang, *Water Resour. Res.*, 40, W03805, doi:10.1029/2003WR002073.
- Zhang, X., L. A. Vincent, W. D. Hogg, and A. Niitsoo (2000), Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century, *Atmos. Ocean*, 38, 395–429.

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

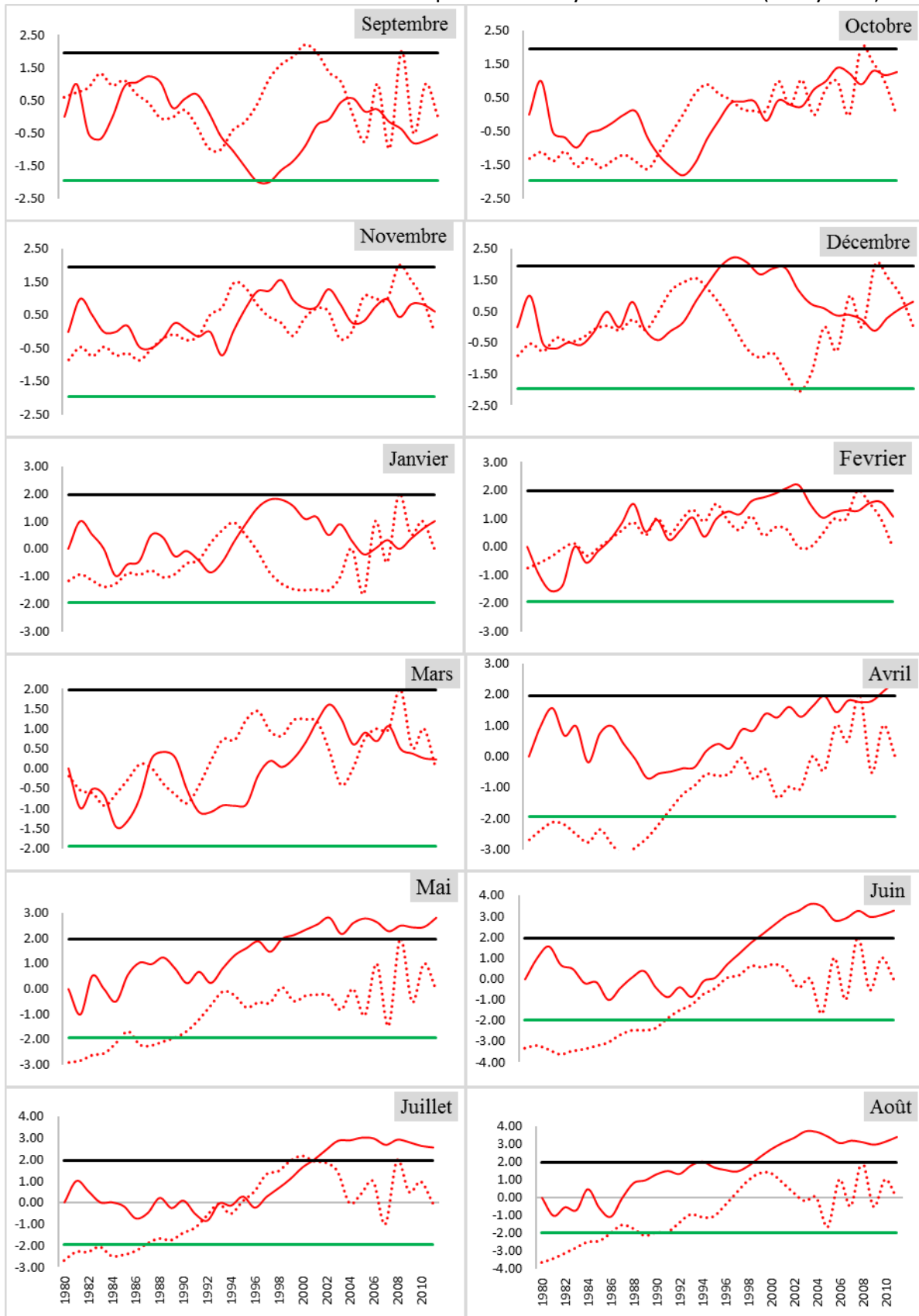
---

Zhu W., Chew Ir & Spangler W. (2005). CEO Transformational Leadership and organizational Outcomes: The Mediating Role of Human-Capital-Enhancing Human Resource Management. The Leadership Quarterly. 16. 39-52. 10.1016/j.leaqua.2004.06.001.

# **ANNEXES**

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

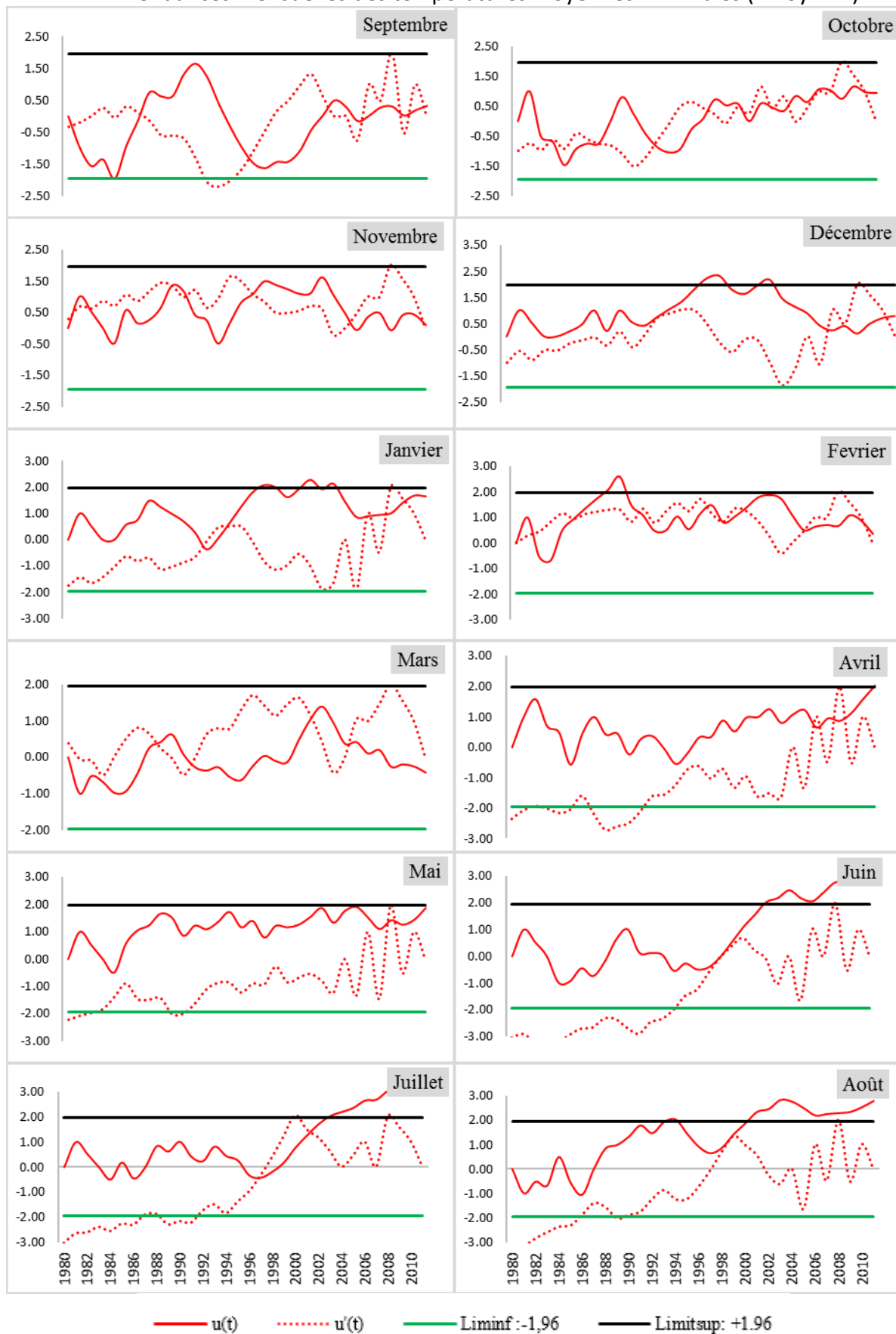
**ANNEXE1 : Tendances mensuelles des températures moyennes maximales (T <sub>moy max</sub>)**



—  $u(t)$     
 ⋯  $u'(t)$     
 — Liminf: -1,96    
 — Limitsup: +1,96

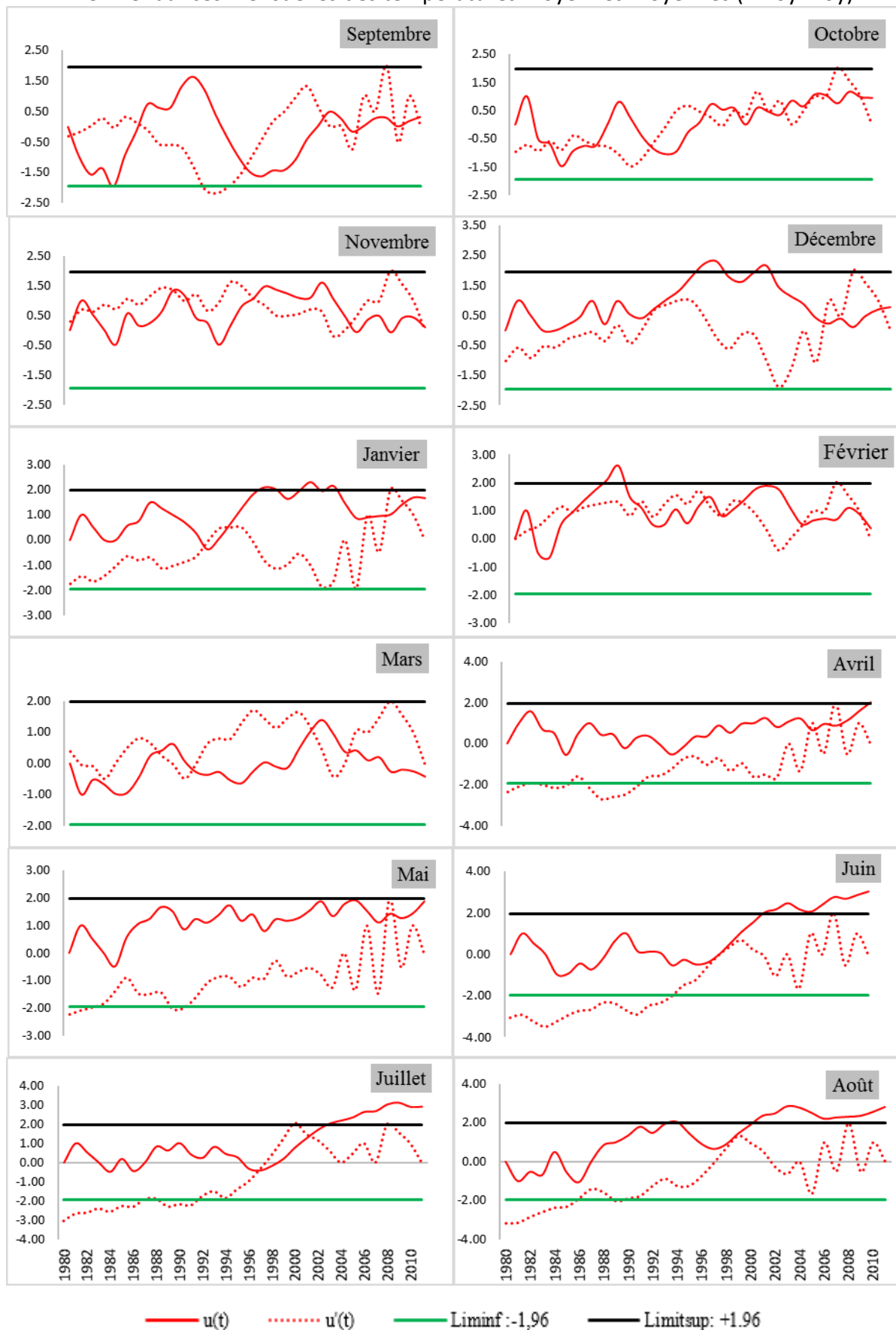
**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 2 : Tendances mensuelles des températures moyennes minimales (T<sub>mo</sub> min)**



**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 3 : Tendances mensuelles des températures moyennes moyennes (T moy moy)**

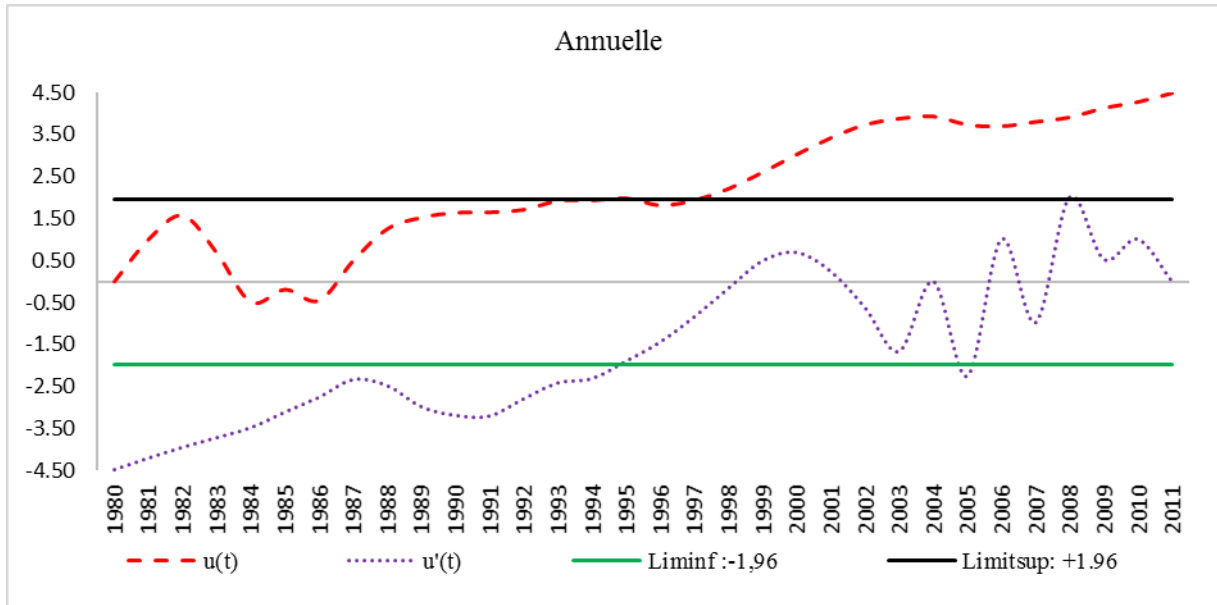


**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 4 : ETP mensuelles calculés au niveau de la station de Guercif (Méthode de Thornthwaite)**

ETP	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
80/81	121	67	32	15	12	21	57	54	93	136	153	177
81/82	116	79	40	30	20	23	43	55	92	155	194	103
82/83	114	61	34	16	12	19	53	62	92	152	180	168
83/84	131	83	42	22	10	22	24	62	65	129	205	171
84/85	113	56	36	19	13	32	33	59	71	128	175	180
85/86	128	79	43	20	20	24	39	45	126	137	200	93
86/87	129	75	34	21	17	25	49	74	100	145	170	100
87/88	136	70	31	26	21	22	49	66	94	128	204	208
88/89	120	77	38	12	13	22	46	49	116	147	222	226
89/90	122	80	41	31	13	32	48	51	93	161	192	182
90/91	146	63	35	16	14	16	33	50	80	154	205	188
91/92	132	57	33	19	12	23	35	67	106	102	173	207
92/93	120	60	34	23	11	20	41	59	95	143	187	175
93/94	109	59	28	21	18	22	42	51	103	137	216	213
94/95	102	72	42	25	19	30	37	50	109	122	178	195
95/96	97	81	50	30	26	19	37	59	87	146	186	168
96/97	99	78	40	31	30	36	50	67	102	131	152	152
97/98	111	83	42	25	19	29	50	55	77	141	183	172
98/99	120	65	36	15	15	16	38	70	112	151	196	191
99/00	119	74	33	18	10	25	38	49	95	161	209	249
00/01	122	48	30	26	17	25	52	65	94	179	248	257
01/02	151	104	30	21	16	23	66	48	100	173	246	282
02/03	132	66	60	9	10	23	47	59	106	209	240	213
03/04	139	70	28	15	19	21	35	48	76	157	224	249
04/05	116	92	28	17	8	12	26	64	123	170	215	194
05/06	109	68	30	15	10	16	47	65	105	139	214	179
06/07	123	84	43	16	16	24	36	46	88	144	229	177
07/08	129	70	37	20	15	22	44	64	83	172	211	206
08/09	122	64	23	15	16	22	25	55	111	188	239	197
09/10	110	88	46	26	22	30	40	62	90	148	223	207
10/11	125	67	34	24	19	19	37	72	101	163	205	216
11/12	123	70	28	19	15	11	34	72	124	169	212	246

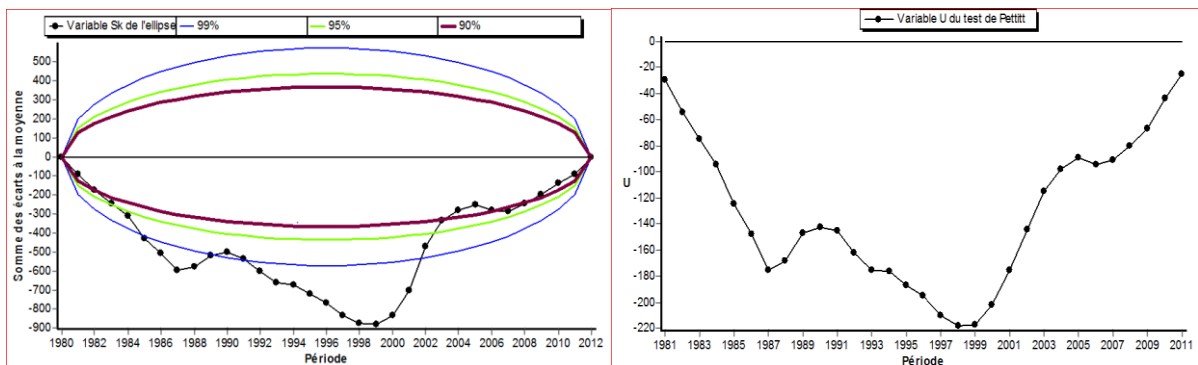
**ANNEXE 5 : ETP Tendence de l'ETP annuelle calculées au niveau de la station de Guercif (Méthode de Thornthwaite)**



**ANNEXE 6 : Ruptures détectées au niveau de la série de l'ETP estimée annuelle (Station de Guercif )**

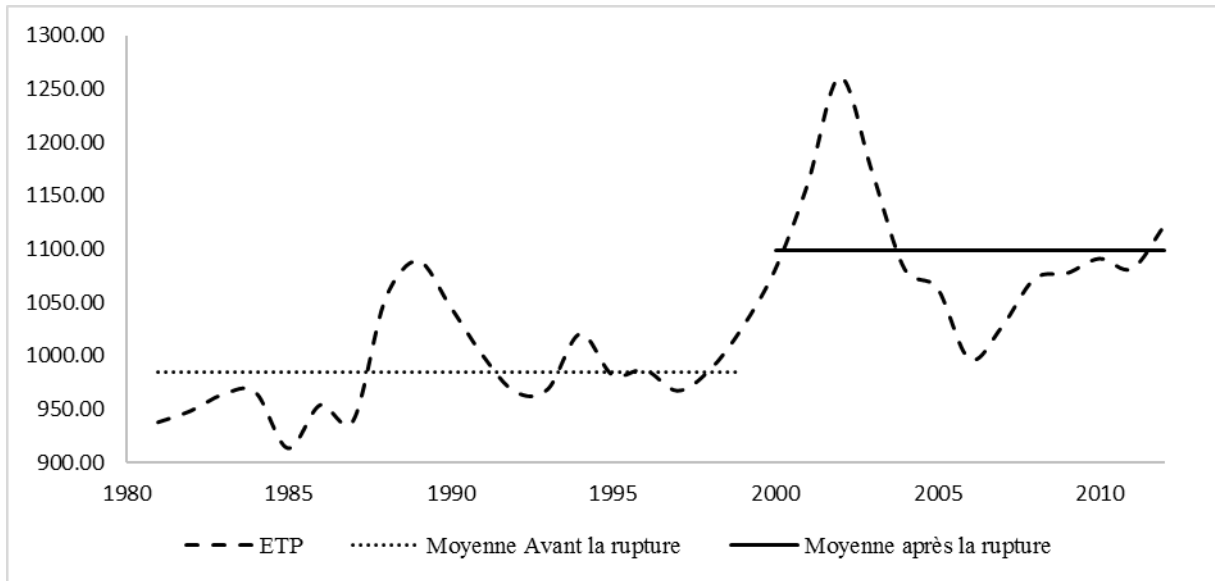
	<b>Pettitt</b>	<b>Buishand</b>	<b>LEE et Higinian</b>	<b>Hubert</b>
<b>Guercif</b>	1998	1998	1999	2000

**ANNEXE 7 : Présentation graphique des tests de Pettitt et de Buishand appliqués à la série de l'ETP estimée annuelle (Station de Guercif )**



**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 8 : valeurs de l'ETP estimée annuelle avant et après les ruptures (Station de Guercif)**



**ANNEXE 9 : Tendances de l'ETP saisonnières calculées au niveau de la station de Guercif (Méthode de Thornthwaite)**

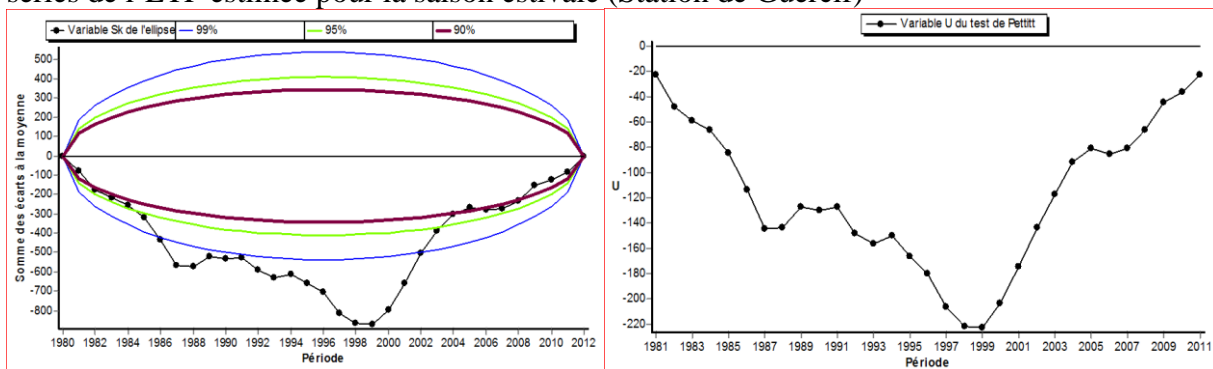


**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 10 : Ruptures détectées au niveau des séries de l'ETP estimée saisonnières (Station de Guercif)**

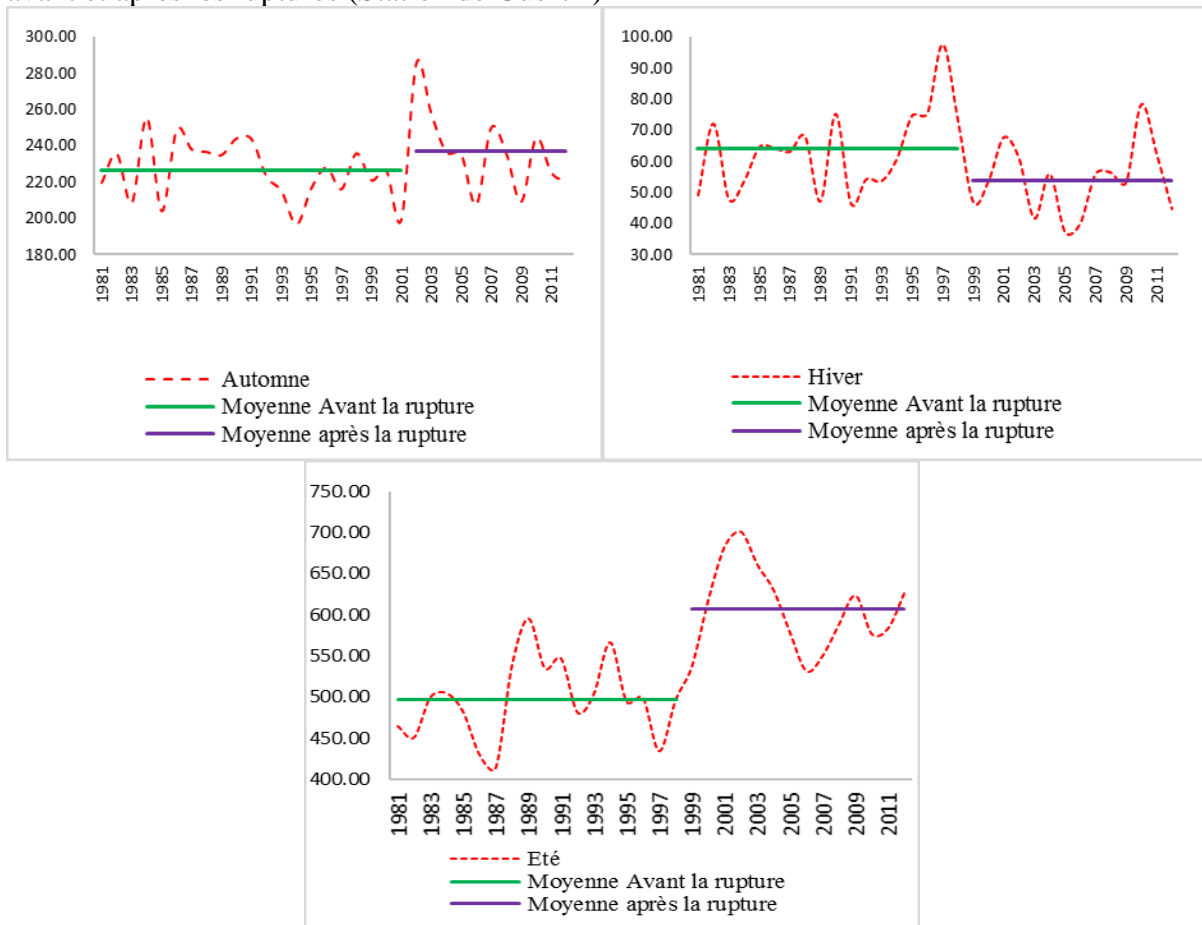
		Automne	Hiver	Printemps	Eté
<b>Guercif</b>	<b>Pettitt</b>				1999
	<b>Buishand</b>				1999
	<b>LEE et Highinian</b>	2001	1998		1999
	<b>Hubert</b>				2000

**ANNEXE 11 : Présentations graphiques des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries de l'ETP estimée pour la saison estivale (Station de Guercif)**



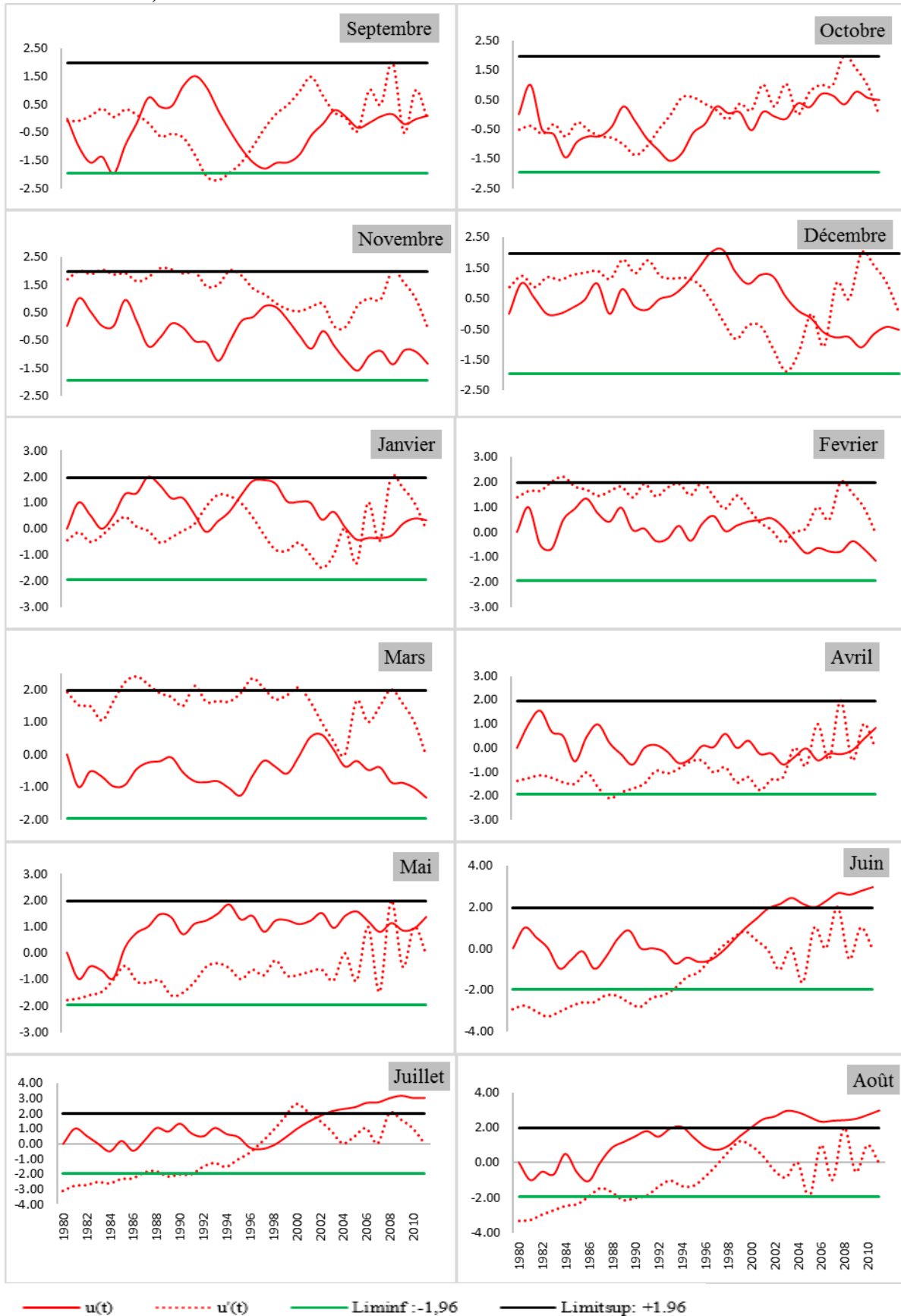
**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 12 : valeurs de l'ETP estimée pour les saisons automnale, hivernale et estivale  
avant et après les ruptures (Station de Guercif)**



**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 13 : Tendances de l'ETP mensuelles calculées au niveau de la station de Guercif (Méthode de Thornthwaite)**

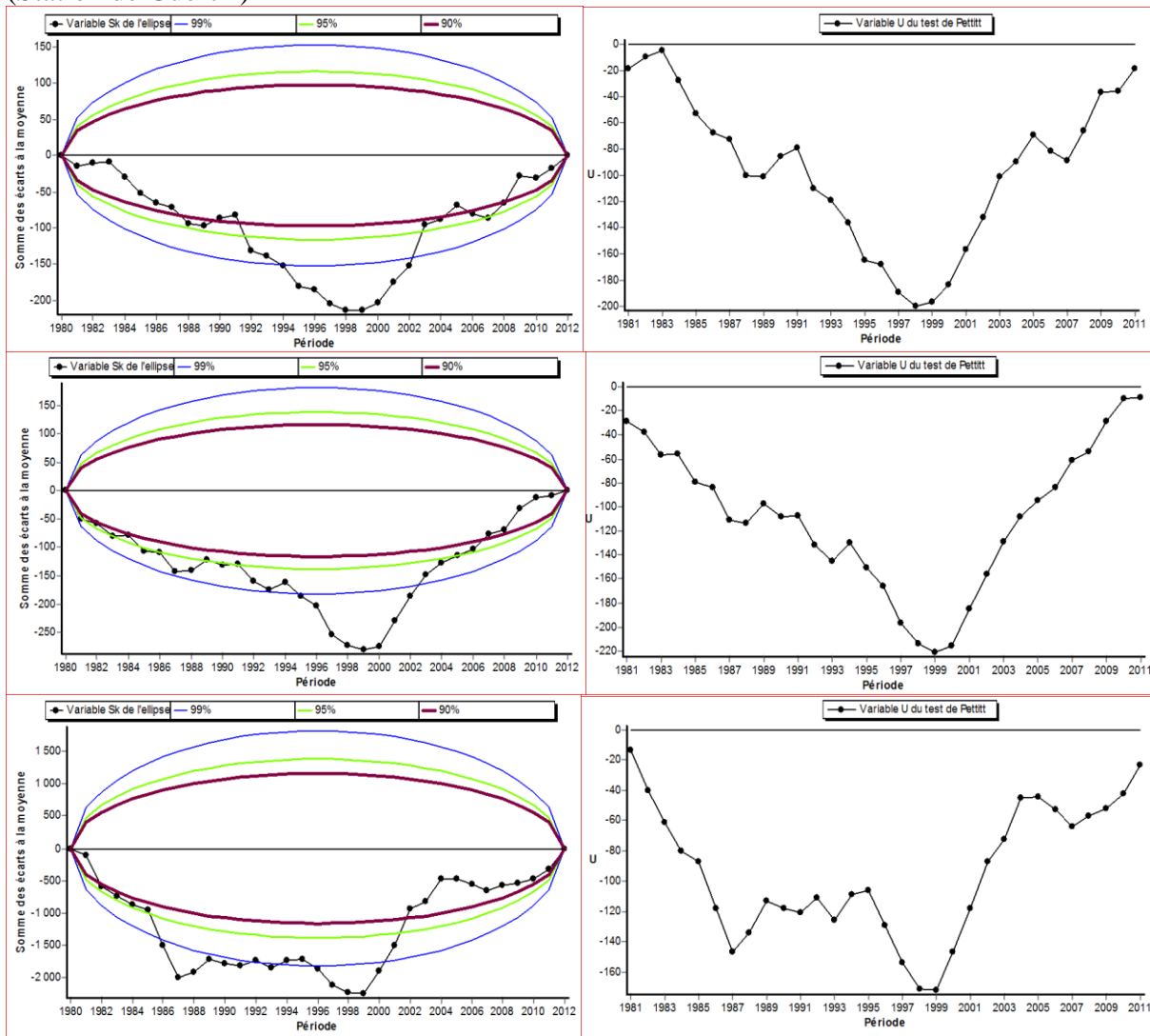


**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

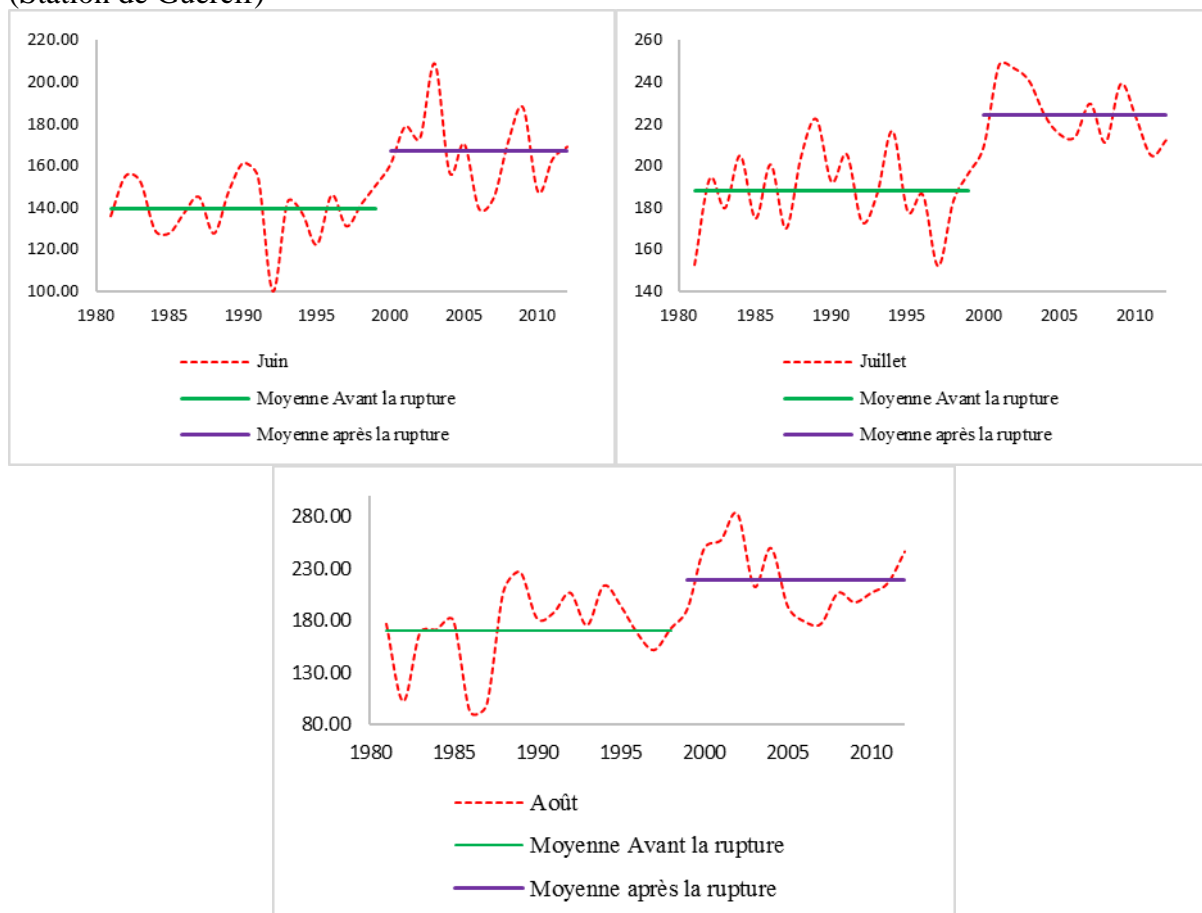
**ANNEXE 14 : Ruptures détectées au niveau des séries de l'ETP estimée mensuelles (Station de Guercif)**

Station	Test	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
		<b>Guercif</b>	<b>Pettitt</b>										<b>1999</b>
	<b>Buishand</b>										<b>1999</b>	<b>1999</b>	<b>1998</b>
	<b>LEE et Highinian</b>										<b>1999</b>	<b>1999</b>	<b>1998</b>
	<b>Hubert</b>										<b>1999</b>	<b>1999</b>	<b>1998</b>

**ANNEXE 15 : Présentations graphiques des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux séries de l'ETP estimée pour les mois de juin (en haut), de juillet (en milieu) et d'août (en bas) (Station de Guercif)**



**ANNEXE 16** : valeurs de l'ETP estimée pour les trois mois d'été avant et après les ruptures  
(Station de Guercif)



**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

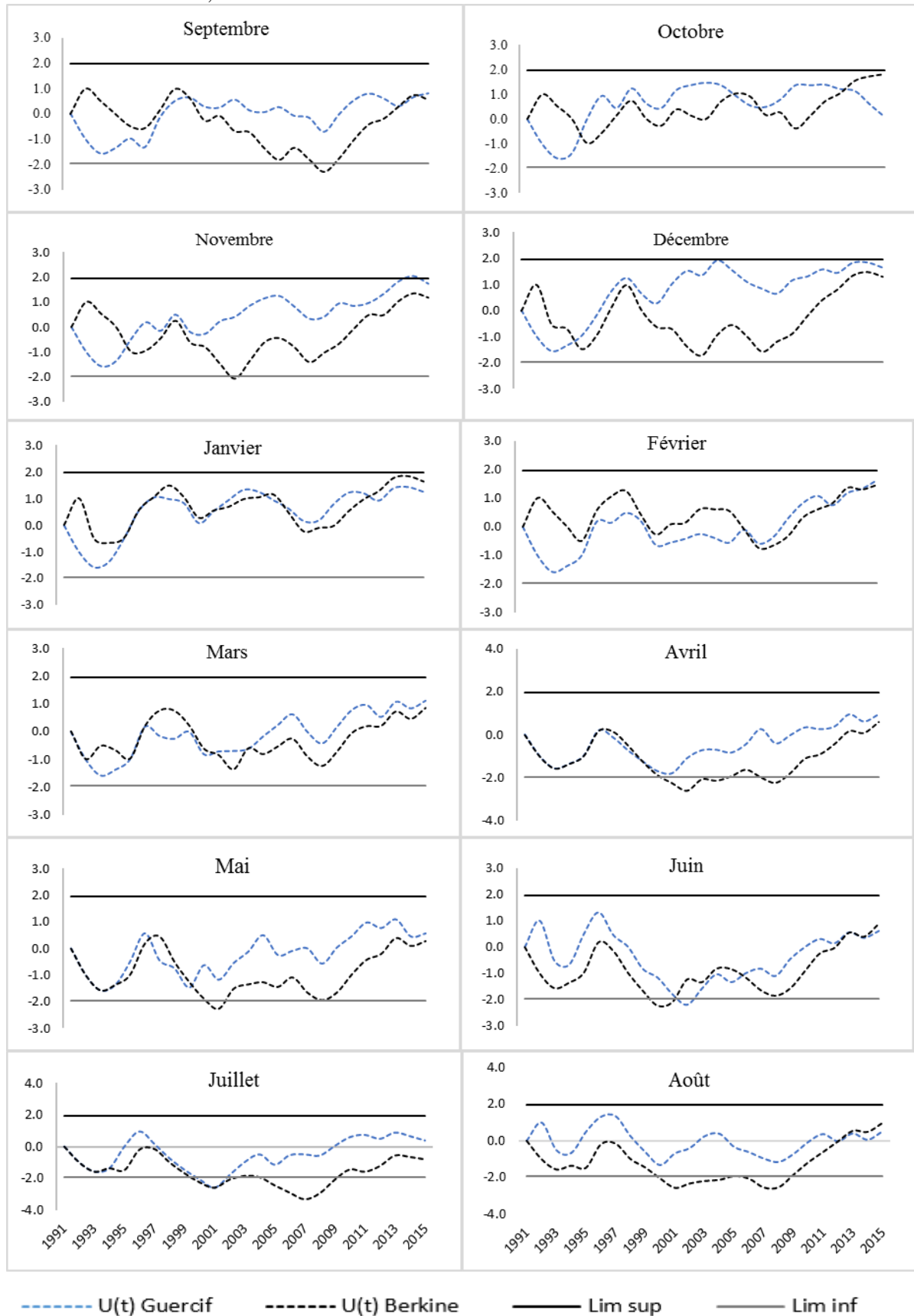
---

**ANNEXE 17 : Débit spécifique d'été**

<b>Année</b>	<b>Guercif (Melloulou)</b>	<b>Belfarah</b>	<b>Berkine</b>
1990/1991	0.1	1.4	0.4
1991/1992	0.1	1.7	0.7
1992/1993	0.0	1.1	0.4
1993/1994	0.0	0.9	0.7
1994/1995	0.2	0.6	0.2
1995/1996	0.0	0.5	0.6
1996/1997	0.0	1.6	1.0
1997/1998	0.0	0.3	0.6
1998/1999	0.0	0.1	0.2
1999/2000	0.0	0.1	0.0
2000/2001	0.0	0.1	0.2
2001/2002	0.0	0.8	0.2
2002/2003	0.0	0.8	0.4
2003/2004	0.4	0.0	0.1
2004/2005	0.0	0.1	0.3
2005/2006	0.1	0.0	0.4
2006/2007	0.0	0.0	0.0
2007/2008	0.0	0.5	0.0
2008/2009	0.5	2.3	0.1
2009/2010	1.4	1.9	1.7
2010/2011	0.4	0.3	2.4
2011/2012	0.0	1.0	1.1
2012/2013	0.2	0.7	2.4
2013/2014	0.1	0.4	1.2
2014/2015	0.0	0.4	1.0

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 18 : Tendances de des modules mensuels des débits enregistrés au niveau des stations de Guercif et de Berkine ; 1990/1991-2014-2015**



**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 19 : Feuille de jaugeage**

<b>rivière</b>				<b>jaugeage n°</b>			
heure début :		fin :		date :			
bassin				code point			
code hydro				superficie du bassin versant		km <sup>2</sup>	
PK				site			
commune				emplacement de la section :			
département							
système Lambert		x lambert	y lambert				
équipe jaugeante :				station hydrométrique :		hauteur début : cm	
						hauteur fin : cm	
perche <input type="checkbox"/> autre <input type="checkbox"/>				hélice : type n°		diamètre cm	
saumon <input type="checkbox"/> poids :				moulinet : type n°		constante de fond : cm	
observations :							

n° verticale	abscisse (m)	profondeur (cm)	nombre de contacts	temps (s)	angle du cable (°)	observations	codage du jaugeage - la section :	
R ...			/	/	/		<b>type de section</b> régulière ou canalisée <input type="checkbox"/> irrégulière <input type="checkbox"/>	
							<b>type de berges</b> rives non abruptes >45° <input type="checkbox"/> rives abruptes >45° <input type="checkbox"/> r.droite >45° et r.g. non <input type="checkbox"/> r.gauche >45° et r.d. non <input type="checkbox"/>	
							<b>nature du fond du lit</b> dépôts compacts <input type="checkbox"/> dépôts mous (fins) <input type="checkbox"/> galets ou blocs <input type="checkbox"/>	
							<b>rugosité</b> ni obstacle ni végét. aq. <input type="checkbox"/> végétation aquatique <input type="checkbox"/> autres obstacles <input type="checkbox"/> végét. aq. et obstacles <input type="checkbox"/>	
							<b>- l'hydraulique :</b> <b>écoulement</b> bien réparti <input type="checkbox"/> zones eau morte/retour <input type="checkbox"/>	
							<b>hauteur d'eau moyenne</b> < 10 cm <input type="checkbox"/> > 10 cm <input type="checkbox"/>	
							<b>type d'écoulement</b> "laminaire" - fluvial <input type="checkbox"/> très faible <input type="checkbox"/> tourbillonnaire <input type="checkbox"/> turbulent - torrentiel <input type="checkbox"/>	
							<b>niveau de l'eau</b> variation nulle ou faible <input type="checkbox"/> rapide ou vannage <input type="checkbox"/>	
section mouillée :			m <sup>2</sup>	profondeur moyenne :		cm	<b>résultats</b> code :	
vitesse moyenne :			m/s	rayon hydraulique :		cm	débit : l/s	
largeur :			m	périmètre mouillé :		m	m <sup>3</sup> /s	

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 20 : Résultats de la bathymétrie du lac de Tameda**

Points	Longitude en (m)	Latitude en (m)	Profondeur en (cm)
1	621737	358764	0
2	621778	358773	24
3	621836	358776	30
4	621867	358782	12
5	621890	358778	18
6	621915	358772	14
7	621797	358887	72
8	621883	358869	86
9	621940	358856	80
10	621921	358924	110
11	621874	358947	98
12	621944	358970	122
13	621970	359041	140
14	621886	359029	165
15	621801	359100	190
16	621853	359110	210
17	621919	359118	180
18	621973	359199	240
19	621906	359244	270
20	621835	359225	250
21	621899	359331	260
22	621862	359318	280
23	622021	359309	275
24	622108	359268	256
25	621974	359448	295
26	622060	359425	325
27	622130	359412	340
28	622216	359390	305
29	622151	359565	345
30	622076	359577	377
31	321993	359592	382
32	621940	359599	364
33	622065	359697	415
34	622118	359784	446
35	622147	359735	433
36	622233	359712	451
37	622303	359752	428
38	622130	358991	494
39	622197	359862	492
40	622282	359847	486
41	622356	359842	470
42	622241	360039	580
43	622315	359977	550
44	622429	359908	535
45	622333	360108	615
46	622442	360108	635
47	622541	360065	607
48	622480	360209	565
49	622562	360181	0

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 21 : Questionnaire utilisée**

Questionnaire sur le changement climatique et les stratégies d'adaptation des usagers de l'eau  
du Bassin Versant

Date : .../.../.....	Heure : .... h ..... mn	N° d'ordre du questionnaire :
I _ I _ I _ I _ I		
Nom du lieu .....		Code : I _ I _ I
Coordonnées géographiques : Lon. ...., Lat. ....		
.....		
L'enquêteur : .....		Code : I _ I _ I

**A. Présentation et caractéristiques socio-économiques de l'enquêté**

1. Sexe : ① Homme    ② Femme    I \_ I
2. Âge : ..... Ans. ① <20ans    ② 20 à 40 ans    ③ 41 à 60 ans    ④ >60 ans    I \_ I
3. Etat matrimonial ? ① Marié    ② Célibataire    ③ Divorcé    ④ Veuf    I \_ I
4. Nombre d'enfants ? .....
5. Niveau d'instruction :  
① Pas d'instruction    ② Coranique    ③ Primaire    ④ Moyen    ⑤ Secondaire    ⑥ Supérieur  
I \_ I
6. Depuis quand habitez-vous la région? .....
7. Catégorie professionnelle : I \_ I \_ I \_ I \_ I  
① Agriculteur    ② Eleveur    ③ Commerçant (artisan)    ④ Association  
⑤ Entreprise/industrie    ⑥ Ménage    ⑦ Autre (à préciser) : .....
8. Depuis quand exercez-vous cette activité ? ..... Et auparavant ?  
.....
9. Est-ce que votre revenu est suffisant ? ① Oui    ② Non    I \_ I
10. Avez-vous des revenus autres que ceux de l'exploitation ? ① Oui    ② Non    I \_ I  
-Si oui, lesquels ? .....
11. Êtes-vous : ① Propriétaire    ② Locataire    ③ Concessionnaire    ④ Métayer  
⑤ Autres : ..... I \_ I
12. Est-ce que l'exploitation (le terrain) est une propriété : ① Privée    ③ Etatique    Autres  
..... I \_ I
13. Quelle est la superficie de l'exploitation ? .....
14. Actifs agricoles (nombre de salariés) ? .....
15. Êtes-vous un membre d'une association ? ① Oui    ② Non    I \_ I  
- Si oui laquelle ? .....

**B.a. La perception des acteurs vis-à-vis du climat (précipitations, température, gel, vent, humidité...)**

1. Selon votre observation, le climat a-t-il changé ? ① Oui    ② Non    I \_ I
2. Si oui, depuis quand ?  
oui, ..... depuis ..... quand ?  
.....

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**3.** Comment s'est-il manifesté (qu'est-ce qui a changé) ?   I  I  I  I  

- ① Précipitations    ② Températures    ③ Gel    ④ Vent    ⑤ Humidité    ⑥ Autres  
.....

**B.b. La perception des acteurs vis-à-vis du Changement Climatique**

**1.** Est-ce que vous avez déjà entendu parler des changements climatiques ?    ① Oui    ② Non  
  I  I  

**2.** Que savez-vous du changement climatique ? - D'où provient-il ? - Qui en est responsable ? - Comment se manifeste-t-il ?  
.....  
.....  
.....  
.....

**3.** Qu'est ce qui vient à votre esprit quand vous entendez 'Changements Climatiques' ?  
  I  I  I  I  I  I  

- ① Le climat    ② Les saisons    ③ L'environnement    ④ Une série de catastrophes    ⑤  
Autres : .....

**4.** Quand vous pensez aux changements climatiques, que ressentez-vous ?

	Faible	Moyen	Fort
① Tristesse			
② Anxiété			
③ Colère			
④ Sympathie			
⑤ Surprise			
⑥ indifférent			

⑦ Autres : .....

**5.** Les changements climatiques sont-ils une bonne ou une mauvaise chose pour votre activité ? Pourquoi ?  
.....  
.....

**6.** De 1 à 10, quel est votre niveau de préoccupation quant au changement climatique ?

1									10
---	--	--	--	--	--	--	--	--	----

**7.** Il vous arrive de discuter des changements climatiques avec vos amis et vos proches ?   I  I    
① Toujours    ② Parfois    ③ Pas toujours    ④ Rarement    ⑤ Jamais

**8.** A votre avis, quelles sont les causes majeures des changements climatiques ?   I  I    
① L'activité humaine    ② Des processus naturels    ③ Des processus naturels et l'activité humaine    ④  
Autres : .....

**9.** Qualité de l'air : ① Bonne    ② Moyenne    ③ Médiocre ? Pourquoi ?   I  I    
.....

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

.....  
 .....  
**10.** Connaissez-vous les gaz à effet de serre (CO2, CH4, CFC, vapeur d'eau, aérosols)\* ? ①Oui  
 ②Non **I\_I**

.....  
 .....  
**11.** Que se passera-t-il si nous ne faisons rien pour réduire les gaz à effet de serre qui proviennent de nos activités ?

① Il n'y aura plus d'hiver                      ② Il ne se passera rien, la planète réussira à retrouver un certain équilibre

③ La planète va continuer de se réchauffer                      ④ Autre : ..... **I\_I**

**12.** Est-ce que vous pensez que le pays va commencer à ressentir les effets des changements climatiques ? ①Oui ② Non **I\_I**

-Si oui, dans combien de temps ? ① - 10 ans    ② 10 à 30 ans    ③ 30 à 50 ans    ④ + 50 ans  
**I\_I**

**13.** Quels sont les signes des changements climatiques que vous avez observés ? **I\_I\_I\_I\_I**

① Changement de la météo	
② Fortes précipitations /les inondations	
③ Changement dans les saisons	
④ Augmentation de la température	
⑤ Mauvaise qualité de l'air	
⑥ La sécheresse	
⑦ La dégradation du couvert végétal	
⑧ Autres : .....	

**14.** Selon vous, Quels peuvent être les impacts de ce changement ?

.....  
 .....  
 .....

**15.** Si vous avez subi des changements dans vos activités pourriez-vous les citer ?

.....  
 .....  
 .....

\*L'enquêteur explique aux enquêtés la notion de Gaz à effet de serre et leurs effets

**C. Adaptation : Quel est le système utilisé pour s'adapter au CC ?**

**1.** Avez-vous développé de nouvelles habitudes pour réduire les effets des changements climatiques ? **I\_I\_I\_I\_I**

Multiplication des semis		Reboisement	
--------------------------	--	-------------	--

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Densification des semis		Réduction des superficies emblavées	
Variétés améliorées		Déplacement des Champs	
Labour		Modification des heures de travail	
Nouvelle culture		Initiation d'activités secondaires	
Technique de fertilisation du sol		Irrigation traditionnelle	

Autres :

.....

**2. Avez-vous réduit la consommation d'eau de votre ménage (foyer, usines,...) ?** ① Oui ② Non  
**I\_I**

- Si oui, comment ? ① En économisant l'eau ② En recyclant l'eau ③ Autres :  
..... **I\_I**

**3. Avez-vous pris des actions pour la réduction des gaz à effet de serre ?** **I\_I\_I\_I\_I**

Comportement écoresponsable		b. Maîtrise de l'énergie		c. Déchets	
① Réduction de la consommation d'eau		① Diminution de la consommation des eaux		① Réduction de la consommation de fourniture	
② Agriculture raisonnée		② Matériels peu consommateur		② Réutilisation	
③ Diminution des intrants		③ Recours à l'énergie renouvelable		③ Recyclage	
④ Autre :..... .....		④ Réduction du déplacement		④ Autres actions :.....	

**4. Est-ce que vous avez eu des difficultés ?**

.....  
.....

**5. Quels sont selon vous les besoins prioritaires à financer pour atténuer le changement climatique ?**

.....  
.....

**6. Les contraintes vis à vis du CC ? lesquels ?**

.....  
.....

**7. Particulièrement, quelles contraintes subies pour s'approvisionner en eau ?**

.....  
.....

**D. Vulnérabilité : Quelles sont les vulnérabilités par rapport au Changement Climatique ?**

1. A votre avis, quels sont les problèmes environnementaux qui existent dans la région et qui pourraient s'aggraver à cause des changements climatiques ? **I\_I**

- ① La sécheresse      ② Le manque d'eau      ③ L'érosion      ④ Les inondations  
⑤ Dégradation des sols agricoles      ⑥ Les pluies torrentielles      ⑦ Autres :  
.....

2. Quels sont les dégâts provoqués par ces problèmes environnementaux ? **I\_I**

- ① Les terres agricoles endommagées      ② La destruction des infrastructures      ③ Des pertes humaines  
④ La destruction des maisons      ⑤ La perte des animaux      ⑥ Autres :  
.....

3. Y a-t-il des systèmes de prévention utilisés lors de ces problèmes environnementaux ? ①

Oui ② Non **I\_I**

- Si oui, lesquels ?  
.....  
.....  
.....

**E. La perception des acteurs vis-à-vis de l'utilisation de l'eau** (En italique pour les agriculteurs)

1. Quel type d'activités pratiquez-vous ? **I\_I\_I\_I\_I\_I\_I\_I\_I\_I**

- ① Céréaliculture      ② Arboriculture      ③ Légumes secs      ④ Elevage (préciser)      ⑤  
Fourrage  
⑥ Maraichage      ⑦ Culture sous serre      ⑧ Autres (à préciser) :  
.....

-Citez les types de produits : .....

2. Est-ce que votre ancien rendement était ? ① Plus faible      ② Stable      ③ Plus important **I\_I**

3. Depuis quand ? ..... Expliquez pourquoi ? **I\_I**

- ① L'eau      ② Les conditions climatiques      ③ Les moyens      ④ Autres : .....

4. Avez-vous un système d'irrigation par : ① Aspersions      ② Goutte à goutte      ③ Pivot      ④  
Autres : ..... **I\_I**

5. Pendant combien de temps irriguez-vous ?  
.....

6. À quelle fréquence ?  
.....

7. À quel moment ?  
.....

8. D'où provient l'eau que vous utilisez ? **I\_I\_I\_I\_I\_I**

- ① Pluviale      ② Barrages      ③ Puits      ④ Bassin      ⑤ Une source naturelle      ⑥ forage  
⑦ eau du robinet  
⑧ Autre : .....

9. Quelle est la Profondeur de vos puits/ forages ?  
.....

10. Avez-vous eu une autorisation pour les réaliser ? ① Oui      ② Non **I\_I**

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

**11.** Par qui ont-ils été financés ? **I\_I**

- ① Par vous-même      ② Par l'Etat      ③ Par une association      ④ Autre (à préciser)

.....

**12.** Combien ont-ils coûté (en DH, DA, DT, Euro) ? .....

**13.** La distance de la ressource d'eau pour l'utilisateur ? ..... m,      Km .....

Autres : .....

**14.** Est-ce qu'il y a des concurrents dans l'usage de l'eau ? **I\_I**

- ① Des habitants      ② Des agriculteurs      ③ Des touristes      ④ Autre (à préciser)

.....

**15.** Comment gérez-vous l'utilisation de l'eau avec les autres ?

.....

.....

.....

**16.** Y-a-t-il des conflits ? ① Oui    ② Non    **I\_I**

-Si oui, avec qui ? Depuis quand ? .....

**17.** Expliquez comment vous faites pour vous assurer d'avoir, constamment, suffisamment d'eau ?

.....

.....

.....

**18.** Que pensez-vous de la qualité d'eau ? ① Normale    ② Polluée    ③ Saumâtre    ④ Bonne

⑤ Autres : ..... **I\_I**

**19.** Quelle est la fréquence de votre approvisionnement en eau du robinet ? **I\_I**

- ① Chaque jour      ② Un jour sur deux      ③ Une fois par semaine      ④ Autre:

.....

**F. Attentes pour avoir des informations sur le Climat et les CC**

**1.** Quelles sont les données météorologiques que vous souhaitez obtenir régulièrement ? **I\_I**

- ① Précipitations    ② Températures    ③ Gel    ④ Vent    ⑤ Humidité    ⑥ Neige    ⑦ Autres :

.....

**2.** Quelles sont les données hydrologiques que vous souhaitez obtenir régulièrement ? **I\_I**

- ① Débit    ② Niveau d'eau    ③ Autres : .....

**G. Perspectives**

**1.** Comment voyez-vous le futur de votre exploitation (perspectives) par rapport à l'eau ?

.....

.....

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 22 : Données pluviométriques en (mm)**

Station de Berkine (1970/19971-2014/2015)

Années	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Totale
1970/71	1.7	16.5	5.7	27.1	62.4	4.2	48.9	93.2	35.9	9.0	17.5	0.0	322.1
1971/72	8.7	0.0	64.7	7.3	58.8	17.5	37.9	20.3	41.0	8.0	0.0	0.0	264.2
1972/73	26.9	41.5	68.0	0.0	6.1	38.0	17.1	84.2	0.0	7.7	0.0	7.7	297.2
1973/74	0.0	17.5	5.5	7.5	0.0	16.0	2.5	46.0	4.0	42.5	8.0	0.0	149.5
1974/75	2.0	0.0	4.0	0.0	0.0	77.0	68.0	117.5	0.0	37.0	0.0	0.0	305.5
1975/76	0.0	0.0	20.5	0.0	0.0	73.0	48.0	104.5	137.5	8.0	10.0	22.0	423.5
1976/77	17.0	26.5	12.5	0.0	31.0	0.0	51.0	29.5	31.0	0.0	0.0	0.0	198.5
1977/78	0.0	9.0	39.0	0.0	10.1	19.6	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.7
1978/79	0.0	0.0	6.0	19.7	5.0	108.7	2.0	2.5	26.0	7.0	0.0	0.0	176.9
1979/80	48.4	58.9	31.2	6.0	15.2	10.0	32.2	21.0	0.0	4.8	0.0	0.0	227.7
1980/81	52.5	0.0	12.0	47.0	5.5	28.0	0.0	48.5	6.0	5.3	0.0	22.1	226.9
1981/82	6.0	14.1	0.0	10.0	15.1	19.1	15.2	105.3	97.2	5.0	16.0	7.1	310.1
1982/83	4.0	75.6	26.0	11.8	0.7	8.0	12.5	3.5	0.0	0.0	0.0	0.0	142.1
1983/84	12.1	9.6	27.4	20.0	14.0	7.1	28.4	35.8	21.0	7.1	7.1	7.1	196.6
1984/85	7.1	7.1	17.5	7.1	68.5	15.2	18.0	27.9	57.2	7.1	8.1	7.1	247.9
1985/86	9.1	7.1	37.3	23.2	20.0	18.5	27.9	15.4	7.1	23.4	7.1	11.1	207.2
1986/87	7.1	22.0	20.1	17.0	74.9	26.4	7.1	7.1	12.1	7.1	30.9	7.1	238.7
1987/88	17.0	20.0	31.9	17.5	19.7	23.9	19.0	13.6	35.3	9.6	14.3	7.1	228.9
1988/89	7.1	33.3	33.8	7.1	19.0	23.4	12.3	10.1	26.9	15.0	8.6	7.1	203.8
1989/90	27.9	28.4	21.5	24.4	16.5	7.1	22.9	36.8	35.8	7.1	11.1	7.1	246.6
1990/91	35.8	10.1	4.7	34.7	2.9	35.9	28.1	34.3	7.8	15.6	33.2	22.5	265.6
1991/92	28.1	22.0	7.4	13.6	21.2	11.4	14.9	16.4	72.8	33.1	9.2	24.4	255.7
1992/93	7.0	0.0	5.4	0.0	5.2	26.1	23.4	12.8	13.9	0.0	0.0	9.9	103.7
1993/94	3.9	3.0	156.9	2.9	59.4	22.9	17.1	3.0	3.5	3.8	5.5	3.3	285.2
1994/95	40.7	21.5	0.0	9.7	0.0	30.6	56.8	67.8	12.5	40.2	3.6	13.4	296.8
1995/96	5.9	16.6	6.6	31.0	55.4	8.2	88.6	36.7	6.2	47.4	22.8	0.0	325.4
1996/97	25.8	10.5	0.0	34.1	27.9	0.5	10.8	48.1	18.4	0.0	0.0	12.6	188.7
1997/98	61.7	21.0	27.5	15.1	4.9	14.1	17.6	0.8	44.0	5.8	16.3	11.8	240.6
1998/99	47.4	0.0	3.5	15.9	30.6	45.6	51.8	0.7	27.0	3.7	1.7	0.7	228.6
1999/00	20.7	29.8	13.8	13.4	8.6	0.0	0.0	1.0	42.7	2.2	0.2	0.8	133.2
2000/01	11.3	133.9	19.4	31.8	8.5	2.3	0.0	4.3	19.6	12.0	0.0	0.9	244.0
2001/02	14.3	32.1	16.6	44.3	0.0	17.3	15.1	9.7	38.8	0.0	0.0	14.7	202.9
2002/03	0.0	11.7	23.6	7.0	15.4	8.0	19.9	35.5	11.3	8.2	8.6	19.3	168.5
2003/04	1.2	39.4	52.9	18.6	2.3	3.8	27.6	9.3	34.7	9.5	3.5	13.5	216.3
2004/05	43.6	22.2	31.9	28.3	7.2	16.2	17.9	0.0	0.9	13.6	5.0	1.1	187.9
2005/06	13.2	19.4	18.0	8.9	34.4	10.2	12.6	43.9	42.6	6.4	50.2	10.8	270.6
2006/07	9.5	29.3	15.4	43.2	5.1	3.8	18.9	143.5	14.8	2.4	8.9	1.2	296.0
2007/08	21.0	88.4	52.3	22.8	26.1	44.2	0.5	1.3	20.9	16.2	32.9	11.0	337.6
2008/09	129.1	149.7	10.3	20.7	44.3	16.6	5.6	0.0	9.3	33.5	17.1	5.5	441.7
2009/10	69.3	3.5	7.7	20.6	14.6	17.5	58.8	68.2	5.4	2.3	17.2	88.7	373.8
2010/11	58.8	30.6	7.8	11.3	2.2	18.7	11.0	22.3	61.5	1.4	2.3	22.7	250.6
2011/12	1.6	14.4	58.2	6.1	23.1	4.9	16.0	28.8	6.5	3.1	2.2	3.1	168.0
2012/13	20.1	41.8	43.4	0.6	21.1	4.1	24.9	1.5	9.2	0.8	10.1	32.9	210.5
2013/14	32.7	2.2	45.3	8.7	16.0	6.5	16.6	2.9	4.0	16.6	4.8	6.2	162.5
2014/15	26.5	9.1	14.3	3.1	13.1	142.7	24.0	20.0	37.2	12.3	7.0	78.9	388.2

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Station de Belfarah (1970/19971-2014/2015)

Années	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Totale
1970/71	0.0	0.0	4.3	16.3	13.2	0.0	7.5	48.3	17.7	0.0	0.0	0.0	107.3
1971/72	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	0.0	24.5	8.3	9.1	0.0	0.0	0.0	50.2
1972/73	8.5	38.1	54.0	0.2	5.2	40.2	7.4	67.6	0.7	0.0	0.0	0.0	221.9
1973/74	0.0	3.8	15.4	29.7	0.3	27.3	19.5	32.2	0.0	34.4	0.0	0.0	162.6
1974/75	0.0	15.4	1.1	0.0	0.5	26.8	28.1	92.9	7.2	21.5	0.0	18.8	212.3
1975/76	0.0	0.0	2.3	1.8	10.0	0.0	7.5	84.0	55.9	0.0	0.0	2.5	164.0
1976/77	0.0	31.8	0.0	17.6	53.8	17.5	27.8	3.7	10.4	0.0	0.0	1.2	163.8
1977/78	13.2	27.8	6.6	12.2	0.0	30.9	0.0	28.1	13.0	0.0	0.0	2.8	134.6
1978/79	0.0	0.0	0.0	19.1	5.9	68.1	6.4	2.5	33.4	0.0	0.0	0.0	135.4
1979/80	21.9	42.0	3.5	0.0	11.0	8.1	22.5	7.5	0.0	0.0	0.0	0.0	116.5
1980/81	0.0	6.5	11.9	4.0	0.0	14.0	11.5	23.4	0.0	10.0	0.0	0.0	81.3
1981/82	0.0	0.0	0.0	1.7	13.6	2.5	10.8	73.9	47.9	0.8	0.0	0.0	151.2
1982/83	2.0	18.6	7.7	4.1	0.0	8.2	12.5	1.4	11.4	0.0	0.0	0.0	65.9
1983/84	0.0	2.5	18.6	9.7	18.5	0.0	19.7	22.0	9.6	0.0	0.0	0.0	100.6
1984/85	0.0	0.0	7.9	2.0	48.6	7.1	11.7	16.2	33.9	0.4	1.5	0.0	129.3
1985/86	0.0	4.0	21.5	19.4	14.7	16.4	22.7	8.2	0.5	8.0	0.0	8.5	123.9
1986/87	2.8	21.3	19.0	13.1	104.8	11.6	0.0	0.8	2.7	0.8	7.8	0.6	185.3
1987/88	6.9	21.8	21.9	6.7	7.6	21.8	13.9	6.9	32.6	1.1	1.0	0.0	142.2
1988/89	0.0	23.1	26.3	0.0	1.7	13.8	5.5	6.9	21.2	9.5	0.2	9.7	117.9
1989/90	38.3	22.1	16.0	12.6	15.0	0.0	15.7	33.6	28.1	2.3	7.1	0.1	190.9
1990/91	41.5	3.6	19.8	61.4	6.7	43.5	40.2	33.1	3.1	8.2	0.7	2.2	264.0
1991/92	13.7	23.6	8.8	18.1	30.4	14.4	13.8	14.8	55.5	39.3	4.8	1.1	238.3
1992/93	0.0	4.3	1.4	1.0	7.2	15.6	30.0	5.8	9.7	8.9	0.0	1.3	85.2
1993/94	0.2	7.2	76.2	5.3	25.9	19.8	7.8	4.2	5.5	1.4	0.0	1.9	155.4
1994/95	10.6	30.1	5.9	16.9	2.6	48.1	35.0	16.2	0.0	28.2	0.0	5.8	199.4
1995/96	7.2	7.1	4.0	18.2	46.4	10.2	66.9	21.0	9.2	28.0	0.0	0.0	218.2
1996/97	18.3	2.5	6.9	40.9	18.0	0.0	27.7	14.8	17.7	0.0	0.0	0.0	146.8
1997/98	43.6	11.0	8.1	33.1	5.8	28.8	24.1	16.6	31.7	0.0	0.0	0.5	203.3
1998/99	21.8	3.2	0.0	14.2	18.3	39.2	24.6	1.4	13.1	0.0	0.0	0.0	135.8
1999/00	2.6	17.7	13.5	12.7	8.5	0.0	0.0	4.1	21.3	0.0	0.0	0.0	80.4
2000/01	1.2	94.6	13.1	31.8	12.8	3.5	2.9	0.3	7.4	4.4	0.0	0.1	172.1
2001/02	4.0	16.7	13.0	52.2	9.6	6.3	5.8	43.6	30.5	0.0	0.0	0.0	181.7
2002/03	0.0	16.4	34.4	4.1	22.3	7.6	33.5	33.9	0.0	2.2	0.0	0.5	154.9
2003/04	0.0	14.0	82.3	14.7	1.4	2.0	32.8	21.3	1.7	9.2	0.0	0.0	179.4
2004/05	0.8	29.8	25.2	4.2	17.0	21.5	19.4	1.6	3.2	3.7	0.0	0.2	126.6
2005/06	0.4	17.0	13.3	7.1	47.5	11.8	14.9	45.0	13.9	1.8	7.0	0.0	179.7
2006/07	3.2	18.2	6.5	21.8	0.1	5.2	4.3	104.0	9.6	0.5	1.4	0.0	174.8
2007/08	2.6	31.1	56.3	8.8	23.2	51.8	4.9	6.1	13.0	0.0	0.0	2.6	200.4
2008/09	59.2	120.3	15.3	27.1	47.5	12.9	6.6	0.3	3.4	14.4	0.3	0.0	307.3
2009/10	30.5	2.0	0.0	51.4	52.7	33.5	54.8	57.9	0.6	2.0	0.4	40.7	326.5
2010/11	22.3	31.1	10.3	14.5	1.9	25.0	29.3	37.4	46.1	1.5	2.2	11.4	233.0
2011/12	0.0	20.1	40.0	1.2	8.7	6.6	37.9	7.8	1.9	1.2	0.6	0.0	126.0
2012/13	10.8	36.0	51.1	0.3	18.6	5.5	28.6	0.5	20.0	0.0	0.0	15.9	187.3
2013/14	2.9	0.0	69.3	14.9	12.5	8.6	5.6	1.0	0.5	13.0	0.4	0.0	128.7
2014/15	10.2	12.4	8.9	10.2	7.4	57.7	46.0	20.3	32.3	0.0	0.0	21.0	226.4

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Station de Guercif (Melloulou) (1970/19971-2014/2015)

Années	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	août	Totale
1970/71	4.8	26.4	0.0	29.4	24.9	0.0	8.9	53.9	51.7	10.5	0.0	12.3	222.8
1971/72	7.5	5.2	21.1	14.8	6.3	3.7	23.6	11.6	1.6	0.9	0.0	1.0	97.3
1972/73	9.1	37.0	19.3	0.7	3.4	18.1	16.8	50.0	0.0	0.3	0.0	0.0	154.7
1973/74	7.7	1.3	22.2	40.0	0.0	22.6	19.8	12.8	0.0	7.6	0.9	0.0	134.9
1974/75	0.0	13.8	2.9	0.0	0.0	17.5	12.9	90.0	7.2	5.4	0.0	12.7	162.4
1975/76	1.6	0.0	1.5	3.3	0.0	19.6	19.6	86.9	81.3	2.6	8.7	5.2	230.3
1976/77	3.4	19.3	0.6	21.7	18.4	20.7	52.9	0.0	5.7	0.0	0.0	1.5	144.2
1977/78	1.4	30.8	14.0	4.6	9.6	20.4	0.3	24.2	6.8	0.0	0.0	14.2	126.3
1978/79	0.0	1.4	0.2	14.0	5.5	34.5	1.2	0.7	10.3	2.2	2.8	0.0	72.8
1979/80	15.4	68.9	0.8	4.7	3.1	3.5	15.1	4.6	8.4	1.6	0.0	0.0	126.1
1980/81	10.0	3.0	12.5	9.6	2.3	24.5	3.9	14.2	1.2	21.5	0.0	3.5	106.2
1981/82	5.2	0.7	0.0	0.6	20.6	2.4	9.6	88.7	27.8	4.7	1.5	1.8	163.6
1982/83	1.4	8.3	10.7	0.6	0.3	7.4	11.2	0.0	10.2	0.0	1.6	1.3	53.0
1983/84	6.5	1.6	24.1	4.6	5.9	0.0	19.2	16.2	15.4	9.0	0.0	0.0	102.5
1984/85	1.3	0.2	10.5	1.3	36.9	11.4	10.6	19.9	46.8	1.1	0.3	0.0	140.3
1985/86	0.8	0.0	19.8	25.3	7.6	9.9	19.3	10.9	0.0	8.0	0.0	9.0	110.6
1986/87	4.0	21.9	21.1	17.6	40.0	7.8	1.4	1.4	3.6	0.2	13.8	0.0	132.8
1987/88	32.7	21.1	11.6	8.0	9.8	9.2	5.5	3.2	18.0	0.8	0.0	0.0	119.9
1988/89	0.0	13.1	24.4	0.0	6.0	6.8	5.5	11.7	20.5	9.6	1.7	0.3	99.6
1989/90	13.6	21.0	8.4	13.3	12.2	0.0	11.7	21.7	24.7	0.2	5.5	0.0	132.3
1990/91	16.4	6.3	8.8	32.7	2.2	26.9	44.5	25.1	1.2	2.0	10.1	6.2	182.4
1991/92	18.2	14.6	8.4	23.9	9.9	7.7	9.7	7.0	45.6	26.0	0.2	0.0	171.2
1992/93	0.0	0.7	5.2	10.8	6.3	12.7	15.5	11.5	6.4	4.2	0.2	1.3	74.8
1993/94	0.4	7.2	80.6	4.6	26.7	20.6	3.6	8.3	8.0	1.1	0.5	0.0	161.6
1994/95	13.5	14.1	2.7	12.7	1.9	45.8	59.2	14.0	0.2	20.1	0.2	8.5	192.9
1995/96	0.3	16.7	0.1	13.2	25.9	4.0	59.4	12.5	5.5	61.2	1.9	1.1	201.8
1996/97	35.7	5.6	0.9	27.4	27.6	0.0	0.6	25.2	11.5	2.2	0.0	17.1	153.8
1997/98	28.7	8.2	9.4	24.7	4.1	20.8	38.4	0.8	4.9	0.0	0.0	1.1	141.1
1998/99	14.1	7.8	3.3	21.9	24.3	34.9	27.2	0.0	19.3	0.0	0.0	0.0	152.8
1999/00	10.4	11.1	13.2	2.6	4.8	0.0	0.0	0.7	25.2	0.0	0.0	0.0	68.0
2000/01	23.0	86.6	21.0	36.9	10.4	3.4	3.2	0.5	11.0	1.2	0.0	8.6	205.8
2001/02	5.5	18.1	27.0	82.6	3.0	6.7	11.8	56.8	43.8	0.0	0.0	8.0	263.3
2002/03	0.0	25.2	59.8	6.5	16.5	12.0	28.8	22.5	3.2	2.3	0.0	2.7	179.5
2003/04	0.0	55.1	64.4	8.8	19.6	4.0	60.6	12.4	13.1	13.8	0.0	2.8	254.6
2004/05	0.0	25.2	29.8	5.7	2.8	29.1	19.8	2.1	0.0	3.5	0.0	0.0	118.0
2005/06	5.0	8.8	11.8	5.9	40.3	10.9	12.6	53.5	18.6	12.0	1.9	0.0	181.3
2006/07	1.6	11.3	3.6	22.2	0.0	6.1	4.0	203.0	15.8	0.0	0.0	0.0	267.6
2007/08	4.9	28.7	49.3	3.9	16.8	29.1	3.3	1.6	11.1	0.0	0.0	0.0	148.7
2008/09	53.7	68.7	27.1	15.1	34.7	7.5	0.9	16.6	7.5	2.0	0.0	0.0	233.8
2009/10	28.5	0.3	4.6	32.4	59.2	39.5	41.0	61.0	0.5	2.2	0.0	40.6	309.8
2010/11	7.3	60.5	10.6	12.2	1.6	17.0	23.4	28.2	49.6	0.0	0.0	4.6	215.0
2011/12	4.5	7.1	22.0	0.5	20.2	7.8	19.5	6.7	0.0	0.0	1.2	0.0	89.5
2012/13	25.2	39.9	55.3	3.5	11.0	13.8	13.9	1.8	13.5	0.0	0.5	10.2	188.6
2013/14	14.2	0.0	57.6	8.6	24.7	4.0	10.0	1.6	7.1	30.0	0.0	0.0	157.8
2014/15	19.9	10.2	10.1	4.2	8.2	20.0	38.2	18.9	40.4	1.0	1.0	15.0	187.1

Source ; Agence du Bassin Hydraulique de Moulouya

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

**ANNEXE 23 : Données hydrométriques en (m<sup>3</sup>/s) :**

**Station de Berkine (1990/1991-2014/2015)**

Années	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Module annuel
1990/1991	0.332	0.222	0.256	0.311	0.227	0.219	2.11	3.66	3.38	2.45	1.26	1.07	1.29
1991/1992	1.01	0.846	0.739	0.568	0.33	0.36	0.604	3.29	3.07	1.85	1.1	0.799	1.21
1992/1993	0.976	0.352	0.429	0.251	0.199	0.349	1.27	1.23	1.22	1.15	0.884	0.642	0.75
1993/1994	0.575	0.47	1.65	0.726	0.484	1.02	1.51	1.59	1.05	0.623	0.403	0.374	0.87
1994/1995	0.49	0.092	0.232	0.244	0.236	0.319	0.625	2.39	2.42	1.64	0.537	0.637	0.82
1995/1996	0.517	0.379	0.299	0.549	2.52	4.33	7.14	6.53	4.77	2.7	1.31	1.23	2.69
1996/1997	1.01	0.518	0.573	0.818	1.73	3.06	2.72	3.2	3.09	1.64	1.33	0.647	1.69
1997/1998	1.04	0.579	0.882	1.76	2.29	2.35	2.02	1.33	0.833	0.504	0.492	0.286	1.20
1998/1999	0.557	0.123	0.138	0.145	0.25	0.297	1.25	1.05	0.62	0.446	0.294	0.325	0.46
1999/2000	0.202	0.233	0.261	0.229	0.22	0.246	0.167	0	0.093	0	0	0.1	0.15
2000/2001	0.64	0.672	0.114	0.293	0.828	1.33	1.13	0.767	0.378	0.797	0.384	0.088	0.62
2001/2002	0.301	0.261	0.09	0.12	0.56	0.515	0.596	0.16	3.22	2.57	1.77	0.63	0.90
2002/2003	0.538	0.299	0.755	0.2	1.59	2.73	2.96	2.68	1.84	0.779	0.926	0.473	1.31
2003/2004	0.051	0.896	0.959	0.822	0.711	0.734	0.791	1.11	1.63	2.02	1.09	0.431	0.94
2004/2005	0.151	0.594	0.54	0.619	0.776	0.73	1.97	1.44	1.04	0.963	0.694	0.544	0.84
2005/2006	0.658	0.359	0.202	0.2	0.2	0.232	2	1.96	2.45	0.598	0.576	0.331	0.81
2006/2007	0.098	0.056	0.01	0.029	0.037	0.036	0.031	0.421	0.038	0.017	0.014	0.012	0.07
2007/2008	0.015	0.402	0.598	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.546	0.367	0.367	0.49
2008/2009	0.912	0.04	0.6	0.6	0.6	1.05	2.56	2.53	1.87	1.41	0.841	0.906	1.16
2009/2010	1.67	0.84	1.52	2.05	2.47	5.52	13.3	6.39	3.66	2.64	2.06	1.2	3.61
2010/2011	1.58	1.73	1.6	2.36	2.42	2.26	2.03	1.99	3.49	2.71	1.49	1.19	2.07
2011/2012	0.731	0.806	0.566	1.4	1.78	1.42	1.59	3.37	2.52	1.81	1.65	1.22	1.57
2012/2013	1.18	10.1	1.99	5.62	5.1	6.34	9.86	11	11.4	10.9	7.99	3.54	7.09
2013/2014	1.22	0.7	0.995	0.8	0.91	0.847	1.05	1.5	0.867	0.941	0.58	0.586	0.92
2014/2015	0.53	0.654	0.49	0.493	0.579	1.51	4.94	7.77	2.88	2.76	2.29	2.14	2.25

**Station de Belfarah (1990/1991-2014/2015)**

Années	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Module annuel
1990/1991	3.96	3.01	4.55	12.4	10.1	11.3	55.6	45.7	12.2	2.77	3.57	7.35	14.38
1991/1992	6.09	4.96	7.46	6.05	9.72	9.87	43.9	39.2	4.72	5.6	3.33	3.53	12.04
1992/1993	4.09	4.87	4.46	5.3	5.4	5.99	8.15	6.33	6.64	3.51	2.22	3.57	5.04
1993/1994	4.29	5.13	26.7	2.76	6.22	14.8	13.8	11.1	9.07	4.25	1.77	1.7	8.47
1994/1995	6.84	4.92	2.65	1.3	1.2	1.55	8.82	9.45	3.33	2.69	1.86	1.27	3.82
1995/1996	0.91	2.83	1.87	9.49	33.3	50.5	71.7	33.7	19.3	13.5	5.55	3.21	20.49
1996/1997	4.35	4.51	4.01	20.9	23	7.8	5.74	9.92	5.03	3.37	3.28	3.25	7.93
1997/1998	4.53	2.72	1.75	2.42	3	7.85	4.37	3.44	3.1	1.18	0.71	0.55	2.97
1998/1999	1.29	0.76	0.76	0.76	1.58	0.88	2.32	1.51	0.88	0.27	0.35	0.22	0.97
1999/2000	2.87	1.37	0.1	1.1	2.17	1.8	1.8	1.8	11.6	0.2	0.2	0.2	2.10
2000/2001	4.55	13.3	1.22	11.2	7.04	3.61	3.66	1.97	1.24	0.65	0.21	1.81	4.21
2001/2002	2.49	2.59	2.35	8.48	4.37	1.66	2.54	8.13	7.26	4.04	2.36	1.73	4.00
2002/2003	1.59	4.35	5.61	3.5	6.23	4.2	11.6	8.28	7.04	4.02	2	1.94	5.03
2003/2004	2.91	3.35	12.6	9.74	1.34	1.39	2.36	0.99	5.26	1.7	1.01	0.01	3.56
2004/2005	1.3	3.39	6.06	4.88	0.6	0.56	0.75	0.12	0.46	0.2	0.2	0.2	1.56
2005/2006	0.19	0.07	1.18	1.73	1.84	5.89	4.54	3.19	0.19	0.5	0.11	0	1.62
2006/2007	0.14	0.06	0	0	0	0	0	11.6	5.3	0.26	0.05	0	1.45
2007/2008	1	4.39	7.36	1	2.16	4.31	2.34	2	2.14	2	2	2	2.73
2008/2009	4.56	16.7	5.84	21.7	30	28.7	21.5	19.3	15.3	11	7.7	14.5	16.40
2009/2010	9.38	4.34	5.4	13.3	16.6	34.8	71.5	17.8	8.49	5.68	5.29	3.85	16.37
2010/2011	2.31	2.53	2.29	5.34	2.82	4.93	2.53	1.12	3.31	0.93	0.59	1.85	2.55
2011/2012	2.04	2.22	12.1	5.8	5.69	5.56	5.73	10.8	3.71	2.3	2.64	2	5.05
2012/2013	1.38	3.13	6.73	1.71	16	24	42	38.4	28.9	24.6	23	24.8	19.55
2013/2014	25.3	22.2	21.7	7.68	6.09	20.2	14.8	0.77	1.41	1.42	1.67	1.36	10.38
2014/2015	5.83	6.18	3.74	4.42	3.64	8.84	1.24	3.31	6.11	7.17	0.77	5.16	4.70

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

Station de Guercif (Melloulou) (1990/1991-2014/2015)

Années	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Module annuel
1990/1991	4.4	2.7	1.2	12.9	1.1	7.5	34.8	31.0	5.9	1.5	0.8	0.4	8.68
1991/1992	1.3	1.1	0.4	0.5	0.2	1.2	2.5	18.5	5.0	4.6	0.3	0.5	3.00
1992/1993	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	2.0	0.6	2.9	0.4	0.0	0.2	0.53
1993/1994	0.0	0.1	29.4	3.9	9.2	22.6	11.2	3.9	3.5	2.7	0.7	0.3	7.29
1994/1995	0.5	5.3	1.8	1.3	1.1	1.4	8.5	8.8	5.2	7.8	1.3	1.3	3.70
1995/1996	0.1	8.4	5.4	12.4	29.6	31.6	59.4	31.3	24.3	29.6	9.7	7.0	20.72
1996/1997	12.6	0.6	0.6	18.7	23.5	7.1	3.6	7.1	1.7	0.6	0.1	1.2	6.45
1997/1998	10.9	16.6	20.0	18.6	4.8	15.5	4.5	1.5	3.3	0.9	0.0	0.2	8.06
1998/1999	1.7	0.2	0.2	0.6	4.0	2.2	8.8	1.3	1.0	0.0	0.0	0.0	1.67
1999/2000	0.4	1.1	1.0	0.6	0.1	0.0	0.0	1.1	9.2	0.5	0.0	0.0	1.17
2000/2001	1.3	24.4	11.9	23.0	11.6	4.7	6.8	1.4	1.6	0.0	0.0	1.3	7.32
2001/2002	2.7	8.3	4.6	21.4	13.4	4.8	4.8	25.6	7.7	0.0	0.9	0.8	7.91
2002/2003	0.1	5.8	17.0	9.5	21.1	5.4	6.4	10.2	7.0	4.0	2.4	2.7	7.63
2003/2004	0.9	4.0	16.2	56.4	5.6	3.9	9.2	5.5	12.6	4.1	1.1	1.1	10.04
2004/2005	1.6	0.7	7.4	3.2	3.1	2.9	9.7	1.9	0.5	0.2	0.0	0.0	2.60
2005/2006	0.4	0.7	0.7	0.9	1.9	8.5	10.6	15.5	5.7	2.8	2.3	0.2	4.19
2006/2007	0.7	1.1	0.4	1.4	0.6	0.7	0.6	34.2	5.5	1.8	0.5	0.0	3.95
2007/2008	0.0	7.0	4.8	1.5	4.3	6.3	2.0	0.6	1.0	0.2	0.3	0.2	2.35
2008/2009	18.0	41.9	20.6	38.2	48.2	44.8	38.9	21.7	12.7	9.3	3.0	1.2	24.88
2009/2010	13.5	4.8	3.6	15.6	24.1	41.2	71.5	23.4	10.1	5.1	3.7	11.9	19.04
2010/2011	4.3	5.0	5.9	19.0	5.5	11.3	10.3	6.6	16.2	4.4	1.1	1.6	7.59
2011/2012	0.7	1.3	17.2	4.5	3.0	2.5	2.5	11.1	3.5	0.8	0.2	0.0	3.94
2012/2013	0.4	3.6	38.7	26.2	40.3	36.8	85.1	57.5	11.7	5.6	2.5	2.3	25.88
2013/2014	4.4	0.2	17.2	14.3	8.3	11.3	4.7	1.9	0.2	0.6	0.2	0.2	5.29
2014/2015	2.0	0.2	1.4	4.1	4.1	30.8	25.9	29.4	6.8	4.5	0.1	4.4	9.48

Source ; Agence du Bassin Hydraulique de Moulouya

**LISTE DES FIGURES**

<b>Figure 1</b> : Carte de localisation de la zone d'étude.....	08
<b>Figure 2</b> : Unités administratives couvertes par le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	09
<b>Figure 3</b> : Sous-bassins versants constituant le bassin de l'Oued Melloulou.....	19
<b>Figure 4</b> : Valeurs de l'indice de KC calculées et spatialisées pour les 11 sous-bassins versants.....	22
<b>Figure 5</b> : Valeurs de l'indice d'Horton calculées et spatialisées pour les 11 sous-bassins versants.....	22
<b>Figure 6</b> : Tranches altitudinales dans le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	23
<b>Figure 7</b> : Etat de maturité du relief des bassins versants selon la forme de la courbe hypsométrique.....	24
<b>Figure 8</b> : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	25
<b>Figure 9</b> : Carte des pentes du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	26
<b>Figure 10</b> : Pourcentages des superficies occupées par les classes des pentes.....	27
<b>Figure 11</b> : Carte du réseau hydrographique hiérarchisée .....	32
<b>Figure 12</b> : Indice de concavité de W.B. LANGBEIN (1964) : $IC = 2A/H$ .....	37
<b>Figure 13</b> : Profils en long du cours d'eau principal et des affluents de la rive gauche.....	37
<b>Figure 14</b> : Profils en long de l'Oued Zebzit et de ses affluents principaux.....	38
<b>Figure 15</b> : Valeurs de densité de drainage calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins...40	
<b>Figure 16</b> : Valeurs de la fréquence de flux calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins...41	
<b>Figure 17</b> : Valeurs du rapport de bifurcation, calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins.....	41
<b>Figure 18</b> : Valeurs de la texture de drainage, calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins.....	42
<b>Figure 19</b> : Valeurs de l'indice de nombre d'infiltration, calculées et spatialisées sur les 11 sous-bassins.....	43
<b>Figure 20</b> : Carte lithologique du bassin versant de l'Oued Melloulou (extraite de la carte géologique du Nord Maroc ; 1/500000.....	45
<b>Figure 21</b> : Carte d'occupation du sol de la zone d'étude (2018).....	48
<b>Figure 22</b> : Chronogramme des données pluviométriques observées.....	53
<b>Figure 23</b> : Climat du bassin versant de l'Oued Melloulou à base de l'indice IM.....	68

<b>Figure 24</b> : Climat du bassin versant de l'Oued Melloulou à base de l'indice AI.....	68
<b>Figure 25</b> : Diagramme ombrothermique du bassin versant de l'Oued Melloulou à base des données de la station de Guercif.....	69
<b>Figure 26</b> : Spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Oued Melloulou par le biais de la méthode d'interpolation krigeage.....	70
<b>Figure 27</b> : Évolution des précipitations en fonction de l'altitude.....	71
<b>Figure 28</b> : Spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Oued Melloulou par le biais de la méthode des isohyètes.....	73
<b>Figure 29</b> : Spatialisation de la pluviométrie moyenne annuelle dans le bassin versant de l'Oued Melloulou par le biais de la méthode de Thiessen.....	75
<b>Figure 30</b> : Méthode des simples cumuls.....	77
<b>Figure 31</b> : Méthode de doubles cumuls.....	78
<b>Figure 32</b> : Présentation graphique des résultats de l'indice de Nicholson appliqué aux pluies annuelles des trois stations de la région d'étude.....	79
<b>Figure 33</b> : Présentation graphique des résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux pluies annuelles des trois stations de la région d'étude.....	82
<b>Figure 34</b> : Moyenne des précipitations cumulées entre les deux périodes, avant et après la rupture, pour les données des stations de Belfrah et Guercif.....	83
<b>Figure 35</b> : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux pluies annuelles des trois stations de la région d'étude.....	85
<b>Figure 36</b> : Ajustement des précipitations annuelles des stations de Berkine, Belfarah et Guercif à la loi normale.....	87
<b>Figure 37</b> : Précipitations moyennes saisonnières des trois stations.....	88
<b>Figure 38</b> : Présentation graphique des résultats des tests de Pettitt et de Buishand appliqués aux pluies automnales des trois stations de la région d'étude.....	89
<b>Figure 39</b> : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux pluies saisonnières des trois stations de la zone d'étude.....	91
<b>Figure 40</b> : Précipitations moyennes mensuelles des trois stations.....	92
<b>Figure 41</b> : Résultats de l'analyse fréquentielle des précipitations mensuelles au niveau des trois stations.....	95

<b>Figure 42</b> : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux séries pluviométriques des mois de Septembre, Octobre, Novembre et avril des trois stations de la zone d'étude.....	99
<b>Figure 43</b> : Représentation graphique du test de Buishand appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Guercif.....	102
<b>Figure 44</b> : Représentation graphique du test de Buishand appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Belfarah.....	102
<b>Figure 45</b> : Moyennes des pluies journalières maximales avant et après la rupture, calculées au niveau de la station de Guercif.....	102
<b>Figure 46</b> : Moyennes des pluies journalières maximales avant et après la rupture, calculées au niveau de la station de Belfarah.....	102
<b>Figure 47</b> : Tracées su test séquentiel de Maan Kendall appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Guercif.....	103
<b>Figure 48</b> : Tracées su test séquentiel de Maan Kendall appliqué aux données des pluies journalières maximales de la station de Belfarah.....	103
<b>Figure 49</b> : Niveaux de retour des pluies journalières maximales selon la période de retour à Belfarah sous l'hypothèse de stationnarité (a) (1970-2015).....	104
<b>Figure 50</b> : Niveaux de retour des pluies journalières maximales selon la période de retour à Guercif sous l'hypothèse de stationnarité (a), de non stationnarité de la période 1970 – 2010 (b), de non stationnarité à base des médianes (c), de non stationnarité basée sur le 95 <sup>ème</sup> percentile des paramètres du modèle ou LR (Lower Risk ) (d) et des niveaux de retour effectifs (e).....	105
<b>Figure 51</b> : Variation moyenne annuelle des températures max, min et moy (1980/2011) de la station hydrométéorologique de Guercif.....	107
<b>Figure 52</b> : Anomalies des températures annuelles max, min et moy (1980/2011) de la station hydrométéorologique de Guercif.....	108
<b>Figure 53</b> : Évolution des courbes U(t) du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux températures annuelles Max, moy et min. (1980, 2011).....	110
<b>Figure 54</b> : Moyennes des températures moyennes maximales et moyennes avant et après les ruptures entre 1980 et 2011.....	111

<b>Figure 55</b> : Présentations graphiques des résultats des tests de Buishand et Pettitt appliqués aux températures moyennes maximales.....	112
<b>Figure 56</b> : Variabilité des températures moyennes, maximales, moyennes et minimales pour les quatre saisons entre 1980 et 2011.....	113
<b>Figure 57</b> : Évolution des courbes $U(t)$ du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux températures moyennes saisonnières max, moy et min. (1980, 2011).....	115
<b>Figure 58</b> : Présentation graphique des résultats des tests de Buishand et de Pettitt appliqués aux températures moyennes maximales et moyennes de la saison estivale (1980 - 2011)...	117
<b>Figure 59</b> : Variabilité des températures moyennes mensuelles.....	118
<b>Figure 60</b> : Résultats de l'analyse fréquentielle des températures moyennes mensuelles (1980-2011).....	120
<b>Figure 61</b> : Courbes des températures moyennes mensuelles, de Q2, des max des Tmoy moy et de C99.....	121
<b>Figure 62</b> : Evapotranspiration moyenne mensuelle estimée au niveau de la station de Guercif.....	126
<b>Figure 63</b> : Variabilité de l'évapotranspiration annuelle entre 1980/1981 et 2011/2012.....	126
<b>Figure 64</b> : Bilans hydriques annuels P-ETP.....	127
<b>Figure 65</b> : Variabilité de l'évapotranspiration réelle ETR annuelle entre 1980/1981 et 2011/2012 estimée par la méthode de Turc (1961).....	129
<b>Figure 66</b> : Variabilité annuelle d'ETR et de P entre 1980/1981 et 2011/2012.....	129
<b>Figure 67</b> : Situation géographique des stations hydrométriques dans le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	135
<b>Figure 68</b> : Méthode des simples cumules appliquée aux données hydrométriques ; 1990/1991-2014/2015.....	136
<b>Figure 69</b> : Variabilité temporelle des modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	138
<b>Figure 70</b> : Variabilité spatiale des modules interannuels des débits selon la superficie du bassin contrôlée (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	138
<b>Figure 71</b> : Méthode des écarts à la moyenne des modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	141

<b>Figure 72</b> : Méthode de CUSUM appliquée aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	142
<b>Figure 73</b> : Coefficient d'hydraulicité appliqué aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	144
<b>Figure 74</b> : Tracés du test séquentiel de Mann-Kendall appliqué aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	146
<b>Figure 75</b> : Ajustement des données hydrométriques à la loi racine Gumbel.....	148
<b>Figure 76</b> : Régimes saisonniers d'écoulement au niveau du BV de Melloulou.....	150
<b>Figure 77</b> : Régime mensuel des débits au niveau du BV de l'Oued Melloulou (1990/1991-2014/2015).....	153
<b>Figure 78</b> : Coefficient mensuel des débits au niveau du BV de l'Oued Melloulou (1990/1991-2014/2015).....	155
<b>Figure 79</b> : Régimes mensuels d'écoulement probable au niveau du BV de l'Oued Melloulou (1990/1991-2014/2015).....	157
<b>Figure 80</b> : Modules mensuels d'écoulement avant et après les ruptures (1990/1991-2014/2015).....	160
<b>Figure 81</b> : Avènement des débits de crue au niveau du BV de Melloulou (1990/1991-2014/2015).....	162
<b>Figure 82</b> : Evolution temporaire des Q <sub>max</sub> enregistrés à Belfarah et à Guercif.....	163
<b>Figure 83</b> : Présentation graphique du test de Buishand appliqué aux débits moyens journaliers maximaux (Q <sub>max</sub> ) enregistrés à Belfarah (à droite) et à Guercif (à gauche) ; 1970/2010.....	165
<b>Figure 84</b> : Moyens des débits moyens journaliers maximaux (Q <sub>max</sub> ) enregistrés à Belfarah (à droite) et à Guercif (à gauche) avant et après les ruptures ; 1970/2010.....	165
<b>Figure 85</b> : Coefficient de Pardé appliqué aux Q <sub>max</sub> enregistrés à Belfarah et à Guercif (1970/2010).....	166
<b>Figure 86</b> : Ajustement des débits moyens journaliers maximaux (Q <sub>max</sub> ) à la loi racine Gumbel ; 1970/2010.....	167
<b>Figure 87</b> : Corrélations entre les Q <sub>max</sub> estimés et ceux jaugés au niveau des stations de Belfarah et de Guercif .....	169
<b>Figure 88</b> : Représentation graphique du test de Buishand appliqué aux données des débits instantanés à la station de Guercif.....	170

<b>Figure 89</b> : Représentation graphique du test de Buishand appliqué aux données des débits instantanés à la station de Belfarah.....	170
<b>Figure 90</b> : Moyennes des débits instantanés d'avant et d'après la rupture, calculées au niveau de la station de Guercif.....	170
<b>Figure 91</b> : Moyennes des débits instantanés d'avant et d'après la rupture, calculées au niveau de la station de Belfarah.....	170
<b>Figure 92</b> : Tracées du test séquentiel de Maan Kendall appliqué aux données des débits instantanés à la station de Belfarah.....	171
<b>Figure 93</b> : Tracées du test séquentiel de Maan Kendall appliqué aux données des débits instantanés à la station de Guercif.....	171
<b>Figure 94</b> : Niveaux de retour des débits instantanés maximaux selon la période de retour à Guercif sous l'hypothèse de stationnarité (a), de non stationnarité de la période 1970 – 2010 (b), de non stationnarité à base des médianes (c), de non stationnarité basée sur le 95 <sup>ème</sup> percentile des paramètres du modèle ou LR (Lower Risk ) (d) et des niveaux de retour effectifs (e).....	173
<b>Figure 95</b> : Niveaux de retour des débits instantanés maximaux selon la période de retour à Belfarah sous l'hypothèse de stationnarité (a) (1970-2010).....	173
<b>Figure 96</b> : Relation pluie/débit au niveau de la station de Berkine .....	175
<b>Figure 97</b> : Décomposition de l'hydrogramme de crue de 05/03 à 16/03/2010.....	176
<b>Figure 98</b> : QMNA enregistrés au niveau des 3 stations choisis.....	180
<b>Figure 99</b> : Débits spécifiques d'étiages calculés au niveau des 3 stations.....	181
<b>Figure 100</b> : Courbes des débits classés de la station hydrométrique de Guercif et de Berkine .....	184
<b>Figure 101</b> : Différence entre QMNA et VCN30.....	186
<b>Figure 102</b> : Courbes des VCN1, 3, 6, 10 et 30 tracées pour les données de Berkine et de Guercif.....	186
<b>Figure 103</b> : Relations entre les VCN Berkine à gauche et ceux de Guercif à droite.....	187
<b>Figure 104</b> : Diagrammes de la sévérité des étiages (ISE) dans les 3 stations.....	189
<b>Figure 105</b> : Exemple d'un profil transversal réalisé sur l'Oued Zebzit.....	195
<b>Figure 106</b> : Situation géographiques des sites de jaugeages choisis sur le terrain.....	196

<b>Figure 107</b> : Résultats des jaugeages pendant les hautes eaux (moyenne de 3 mesures ; Avril 2016 et Mars 2017 et 2018).....	197
<b>Figure 108</b> : Résultats des jaugeages pendant les basses eaux (moyenne de 3 mesures ; Septembre 2016, 2017 et 2018).....	198
<b>Figure 109</b> : Profils hydrologiques de l'Oued Melloulou.....	199
<b>Figure 110</b> : Zones irriguées par les principaux séguias.....	200
<b>Figure 111</b> : Profils hydrologiques de l'Oued Zebzit.....	201
<b>Figure 112</b> : Cartes des rendements hydrologiques pour la période des hautes eaux .....	203
<b>Figure 113</b> : Cartes des rendements hydrologiques pour la période des basses eaux .....	204
<b>Figure 114</b> : Lac de Tameda.....	205
<b>Figure 115</b> : Carte bathymétrique du lac de Tameda réalisées à partir des données de terrain (mesures de 28 à 30 avril 2017).....	207
<b>Figure 116</b> : Carte bathymétrique du lac de Tameda réalisées à partir des données de terrain (mesures de 25/07/2017 et de 19/06/2018).....	208
<b>Figure 117</b> : Évolution de la population au niveau des communes rurales de l'amont du bassin entre 1994 et 2014.....	213
<b>Figure 118</b> : Répartition des terres agricoles en montagnes du bassin .....	215
<b>Figure 119</b> : Évolution de la population au niveau des communes rurales chevauchant sur la partie aval du bassin entre 1994 et 2014.....	216
<b>Figure 120</b> : Tranches de superficie des parcelles agricoles irriguées en amont.....	217
<b>Figure 121</b> : Schéma explicatif du transfert de l'eau de l'Oued jusqu'à la parcelle.....	218
<b>Figure 122</b> : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2000.....	220
<b>Figure 123</b> : Cartes d'occupation du sol de la partie aval en 2018.....	220
<b>Figure 124</b> : Tranches des superficies des terrasses agricoles en aval.....	219
<b>Figure 125</b> : Tranches de superficie des exploitations agricoles au niveau du périmètre irrigué de Taddart.....	224
<b>Figure 126</b> : Niveau de satisfaction en eau d'irrigation au niveau du périmètre irrigué de Taddart.....	224
<b>Figure 127</b> : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Taddart et ses environs en 2000.....	225

<b>Figure 128</b> : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Taddart et ses environs en 2018.....	226
<b>Figure 129</b> : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Guercif et ses environs en 2000.....	228
<b>Figure 130</b> : Carte d'occupation du sol du périmètre irrigué de Guercif et ses environs en 2018.....	229
<b>Figure 131</b> : Cartes montrant les types d'eau utilisée pour l'irrigation pour chaque tronçon.....	230
<b>Figure 132</b> : Exemple de carte de gestion des droits à l'eau sur les terrasses agricoles .....	233
<b>Figure 133</b> : Cartes de la dynamique des terrasses fluviales entre 2002 et 2018.....	237

#### LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b> : Provinces et Communes traversées par le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	09
<b>Tableau 2</b> : Correspondance entre la valeur de Kc, la forme et le type de réponse hydrologique attendue. Source : Roche, 1963 in Obda, 2004.....	15
<b>Tableau 3</b> : Indices de forme, calculés pour le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	18
<b>Tableau 4</b> : Noms des sous bassins affichés sur la carte.....	20
<b>Tableau 5</b> : Résultats des indices de formes, calculés pour les sous bassins versants de l'Oued Melloulou.....	21
<b>Tableau 6</b> : Répartition des altitudes dans le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	24
<b>Tableau 7</b> : Classification de de l'énergie de relief en fonction de l'indice de pente globale...29	
<b>Tableau 8</b> : Correspondance type de relief et le dénivelé spécifique Source : Roche, 1963 in Obda, 2004.....	29
<b>Tableau 9</b> : Résultats des indices de relief pour la totalité du bassin versant .....	30
<b>Tableau 10</b> : Ordination du réseau hydrographique des cinq sous-bassins versants.....	32
<b>Tableau 11</b> : Résultats des indices de réseau hydrographique dans le bassin.....	36
<b>Tableau 12</b> : Indices des profils longitudinaux du cours d'eau principal et des affluents de la rive gauche.....	38
<b>Tableau 13</b> : Indices des profils longitudinaux de l'Oued Zebzit et de ses affluents principaux.....	39
<b>Tableau 14</b> : Résultats des indices du réseau hydrographique pour les 11 sous bassins .....	39
<b>Tableau 15</b> : Résultats des rapports de longueurs des sous bassins versants.....	43

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

<b>Tableau 16</b> : Superficie occupée par chaque formation lithologique dans le bassin versant....	46
<b>Tableau 17</b> : Types d'occupation du sol .....	48
<b>Tableau 18</b> : Situation géographiques de stations climatiques.....	52
<b>Tableau 19</b> : Variation de la pluviométrie annuelle (1970 - 2015) à Berkine, Belfarah et Guercif.....	54
<b>Tableau 20</b> : Classification des types de climat en fonction de l'indice IM.....	57
<b>Tableau 21</b> : Classification des types de climat en fonction de l'indice AI =P/ETP .....	58
<b>Tableau 22</b> : Classification de la sécheresse selon l'Indice de Nicholson (SPI).....	58
<b>Tableau 23</b> : Degré de significativité des tendances selon les valeurs de P-Value.....	65
<b>Tableau 24</b> : Lames d'eau précipitées entre les isohyètes .....	74
<b>Tableau 25</b> : Lames d'eau précipitées entre les polygones de Thiessen.....	75
<b>Tableau 26</b> : Lame d'eau précipitée estimée par les trois méthodes précédentes.....	76
<b>Tableau 27</b> : Nombre d'années déficitaires et excédentaires selon les résultats de l'indice de Nicholson.....	80
<b>Tableau 28</b> : Nombre d'années et pourcentage de chaque classe de l'indice de Nicholson.....	80
<b>Tableau 29</b> : Tendances des données pluviométriques annuelles au niveau des trois stations choisis.....	84
<b>Tableau 30</b> : Estimation des précipitations en fonction des périodes de retours choisis à base de la loi normale, appliqué au niveau des stations de Berkine, Belfarah et Guercif entre 1970 et 2015.....	87
<b>Tableau 31</b> : Différentes ruptures détectées dans les séries pluviométriques saisonnières...88	
<b>Tableau 32</b> : Différentes tendances remarquées dans les séries pluviométriques saisonnières.....	90
<b>Tableau 33</b> : Variabilité mensuelle des précipitations des trois stations.....	93
<b>Tableau 34</b> : Ruptures détectées dans les séries pluviométriques mensuelles.....	96
<b>Tableau 35</b> : Différentes tendances remarquées dans les séries pluviométriques mensuelles.....	97
<b>Tableau 36</b> : Indices liés aux précipitations calculées par le logiciel RClindex qui présentent une tendance significative à l'échelle annuelle.....	100
<b>Tableau 37</b> : Indices liés aux précipitations calculées par le logiciel RClindex qui présentent une tendance significative à l'échelle mensuelle.....	100

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

<b>Tableau 38</b> : Fréquence de retour probables estimées des pluies journalières maximales de selon les différentes hypothèses au niveau des deux stations hydrométriques choisies.....	104
<b>Tableau 39</b> : Tendances des températures annuelles max, min et moy au niveau de la station de Guercif .....	109
<b>Tableau 40</b> : Ruptures détectées au niveau des températures annuelles max, min et moy au niveau de la station de Guercif.....	110
<b>Tableau 41</b> : Différentes tendances remarquées dans les séries des températures moyennes saisonnières.....	114
<b>Tableau 42</b> : Différentes ruptures détectées au niveau des séries moyennes saisonnières des températures maximales, moyennes et minimales (1980 - 2011).....	116
<b>Tableau 43</b> : Moyennes des températures avant et après les ruptures .....	118
<b>Tableau 44</b> : Tendances des températures moyennes mensuelles selon le test classique de Mann-Kendall.....	122
<b>Tableau 45</b> : Indices liés aux températures calculés par le logiciel RCLimindex qui présentent une tendance significative.....	123
<b>Tableau 46</b> : Tendance des Indices liés aux températures moyenne journalière calculées à l'échelle mensuelle.....	124
<b>Tableau 47</b> : Bilans hydriques mensuels P-ETP.....	126
<b>Tableau 48</b> : Séries de données hydrométriques utilisées .....	134
<b>Tableau 49</b> : Pourcentages des années déficitaires et excédentaires issues de la méthode des écarts à la moyenne .....	141
<b>Tableau 50</b> : Débits moyens avant et après les ruptures.....	144
<b>Tableau 51</b> : Résultats du test de Mann-Kendall et de la pente de Sen, appliqués aux modules annuels des débits (1990/1991-2014/2015) au niveau des trois stations disponibles.....	145
<b>Tableau 52</b> : Débits estimées selon les temps de retour choisis par la loi racine Gumbel.....	148
<b>Tableau 53</b> : Lamme d'eau écoulée et estimation des pertes au niveau du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	149
<b>Tableau 54</b> : Nombre saisonnier d'années déficitaires et excédentaires selon les saisons.....	151
<b>Tableau 55</b> : Moyennes des débits calculées avant et après les ruptures au niveau des séries hydrométriques saisonnières (1990/1991-2014-2015).....	152

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

<b>Tableau 56</b> : Tendances des débits moyens saisonniers selon le test classique de Mann-kendall.....	152
<b>Tableau 57</b> : Coefficients de variation calculés pour les modules mensuelles des débits ; 1990/1991-2014-2015.....	158
<b>Tableau 58</b> : Ruptures détectées au niveau des séries de données hydrométriques mensuelles.....	158
<b>Tableau 59</b> : Tendances des séries de données hydrométriques mensuelles au niveau des stations de Guercif et de Berkine.....	161
<b>Tableau 60</b> : Variabilité temporelle des QJmax enregistrés à Belfarah et à Guercif.....	163
<b>Tableau 61</b> : Tendances des QJmax enregistrés à Belfarah et à Guercif ; 1970/2010.....	164
<b>Tableau 62</b> : QJmax estimés pour différents temps de retour.....	168
<b>Tableau 63</b> : Débits de retour probables estimés selon les différentes hypothèses au niveau des deux stations hydrométriques choisies.....	174
<b>Tableau 64</b> : Fréquence d'apparition des QMNA selon les mois de l'année (1990/1991-2014-2015).....	178
<b>Tableau 65</b> : Variabilité temporelle des QMNA enregistrés au niveau des 3 stations.....	179
<b>Tableau 66</b> : Tendances des QMNA enregistrés à Berkine et à Guercif.....	181
<b>Tableau 67</b> : Seuils des débits spécifiques d'étiages au niveau des 3 stations.....	182
<b>Tableau 68</b> : Valeurs des débits caractéristiques déterminées .....	184
<b>Tableau 69</b> : Comparaison entre les valeurs de QMNA et celles de VCN30 (Stations de Berkine et de Guercif).....	188
<b>Tableau 70</b> : Codes, noms et abréviations des sites de jaugeage.....	196

#### LISTE DES PHOTOS

<b>Photo 1</b> : Oued Melloulou à 200 m en aval de la source de l'Oued Elbared.....	25
<b>Photo 2</b> : Marnes de miocène au nord de Ras Lakser.....	26
<b>Photo 3</b> : Exemple des terrasses agricoles dans la même zone.....	26
<b>Photo 4</b> : Forêt de Tamtroucht ( commune rurale de Bouiblane ) ; le 11/10/2016.....	47
<b>Photo 5</b> : Forêt de Jbel Ait Boumlal (Commune rurale de Maghraoua) 23/07/2017.....	47
<b>Photo 6</b> : Une partie de la forêt de Maghraoua le 25/08/2016.....	47
<b>Photo 7</b> : Forêt de Jbel Admam (Commune rurale de Maghraoua) le 30/07/2017.....	47

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

<b>Photo 8</b> : Station hydroclimatique de Guercif Melloulou.....	135
<b>Photo 9</b> : Jaugeage par exploration du champ de vitesses à travers un moulinet hydrométrique.....	190
<b>Photo 10</b> : Choix du site de jaugeage.....	193
<b>Photo 11</b> : Oued Melloulou à environ 100m en aval de la source de l'Oued El Bared ; le 21/07/2017.....	202
<b>Photo 12</b> : Source de l'Oued El Bared (21/07/2017).....	202
<b>Photo 13</b> : Assèchement totale du lac ; le 25/06/2018.....	206
<b>Photo 14</b> : Canot pneumatique utilisé rejoindre le lac de Tameda.....	206
<b>Photo 15</b> : Mesure de la hauteur de l'eau du lac lors de son remplissage maximal (25/06/2018).....	208
<b>Photo 16</b> : Petit séguia en bois utilisé pour l'irrigation.....	214
<b>Photo17</b> : Séguia en terre.....	214
<b>Photo 18</b> : Bassin de stockage (Tijent).....	214
<b>Photo 19</b> : Basses terrasses agricoles irriguées pas les Séguias.....	218
<b>Photo 20</b> : Exemple de barrage traditionnel (Ouggouy) utilisé pour le transfert de l'eau de l'Oued vers les Séguias.....	218
<b>Photo 21</b> : Séguia en béton en plus d'un Mesref et d'une vanne .....	218
<b>Photo 22</b> : Exemple de Séguia en béton armé.....	218
<b>Photo 23</b> : Grand canal de Taddart.....	226
<b>Photo 24 et 25</b> : Exemple des Séguias secondaires de Taddart.....	226
<b>Photo 26</b> : Digue de transfert des eaux vers le séguia de Guercif (14 mai 2017).....	227
<b>Photo 27</b> : Panneaux solaires utilisés pour le pompage.....	228
<b>Photo 28</b> : Pompage de l'eau en utilisant le gaz du butane.....	228
<b>Photo 29</b> : Pompage de l'eau en utilisant le gazoile.....	228
<b>Photo 30 et 31</b> : Contact direct entre les activités agricoles et les berges du cours d'eau au niveau de l'oued Melloulou aval.....	240

**TABLE DES MATIERES:**

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>1</b>
<b>RESUME.....</b>	<b>2</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>3</b>
<b>ملخص.....</b>	<b>4</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>6</b>
<b>CHOIX ET JUSTIFICATION DU TERRAIN D'ETUDE.....</b>	<b>7</b>
<b>PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE.....</b>	<b>10</b>
<b>METHODOLOGIE ADOPTEE.....</b>	<b>11</b>

**CHAPITRE I : CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SES PRINCIPAUX AFFLUENTS**

Introduction du chapitre.....	14
1 Délimitation du bassin versant de l'oued Melloulou.....	14
2 Indices de forme.....	14
2.1 Indice de Gravilius.....	14
2.2 Coefficient de circularité de Miller (1953).....	15
2.3 Rectangle équivalent.....	15
2.4 Indice de forme d'Horton.....	16
2.5 Indice de forme inverse.....	16
2.5.1 Indice d'élongation.....	17
2.5.2 Indice d'allongement ou d'élanement du bassin.....	17
2.6 Indice d'allongement moyen.....	17
2.7 Indice d'allongement à partir du rectangle équivalent.....	17
2.8 Indice de développement.....	17
2.9 Indice d'étalement du bassin.....	18
2.10 Résultats des indices de forme.....	18
3 Analyse du relief.....	23
3.1 Hypsométrie du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	23
3.2 Courbe hypsométrique.....	24
3.3 Répartition des pentes dans le bassin versant de l'oued Melloulou.....	26
4 Indices de reliefs.....	27
4.1 Altitudes maximales et minimales.....	27
4.2 Dénivelé théorique (Dt).....	27
4.3 Altitude moyenne.....	27
4.4 Altitude médiane.....	28
4.5 Indice de soulèvement (Rt) .....	28
4.6 Indice de pente globale Ig.....	28
4.7 Indice de pente Im.....	29
4.8 Dénivelée spécifique Ds.....	29
4.9 Résultats des indices de relief.....	30
5 Réseau hydrographique.....	30
5.1 Classification des talwegs. ....	31
5.2 Densité de drainage.....	33
5.3 Fréquence de flux.....	33

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

5.4	Rapport de bifurcation (Rb) .....	34
5.5	Longueur moyenne des cours d'eau (Lm) .....	34
5.6	Texture de drainage.....	34
5.7	Nombre d'infiltration (si) .....	35
5.8	Rapport des longueurs (RI) .....	35
5.9	Résultats des indices du réseau hydrographique.....	35
6	Profils en long.....	36
6.1	Profil de l'Oued Melloulou.....	37
6.2	Profil de l'oued Zebzit et ses affluents.....	38
7	Estimation des indices hydromorphométriques pour les 11 sous bassins.....	39
8	Contexte structural et lithologique du bassin versant de l'oued Melloulou.....	43
8.1	Perméabilité du terrain.....	44
9	Couverture végétale du bassin versant de l'oued Melloulou.....	46
	Conclusion du chapitre.....	48

**CHAPITRE II : CONTEXTE CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SON IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE**

Introduction du chapitre.....	51
1 Données climatiques utilisées.....	51
1.1 Correction, homogénéisation des données et comblement des lacunes.....	54
☐ Examen graphique des simples cumules.....	54
☐ Examen graphique des doubles cumules.....	55
☐ Comblement des lacunes.....	55
2 Méthodes de synthèse climatique et d'analyse des données.....	56
2.1 Synthèse climatique : Indices d'aridité.....	56
2.1.1 Indice d'aridité annuelle de De Martonne (1926) .....	57
2.1.2 Indice d'aridité UNEP (1997) .....	57
2.2 Evaluation du degré de la sécheresse annuelle selon l'indice pluviométrique de Nicholson.....	58
2.3 Tests de tendance.....	58
2.3.1 Test classique de Mann-Kendall.....	59
2.3.2 Estimation de la pente de Sen.....	60
2.3.3 Test « de tendance » séquentiel de Mann-Kendall. ....	60
2.4 Tests de détection des ruptures.....	61
2.4.1 Test de Pettitt.....	62
2.4.2 Statistique de Buishand.....	62
2.4.3 Procédure de segmentation des séries hydrométéorologiques (d'Hubert).....	63
2.5 Traitement des séries de données journalières à base des indices recommandés par l'OMM.....	64
2.6 Analyse des évènements hydroclimatiques extrêmes selon la loi GEV.....	66
3 Contexte climatique aride du bassin versant de l'oued Melloulou.....	67
3.1 Contexte climatique du bassin versant de l'oued Melloulou.....	67
3.2 Caractérisation de l'aridité du bassin.....	67
4 Variabilité spatiale des précipitations et estimation de la lame d'eau précipitée.....	69
4.1 Variabilité spatiale des précipitations.....	69
4.2 Estimation de la lame d'eau précipitée sur le bassin.....	71
4.2.1 Méthode arithmétique.....	71
4.2.2 Méthode des isohyètes.....	72
4.2.3 Méthode de Thiessen.....	74

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

4.2.4	Polygones de Thiessen.....	74
4.2.5	Coefficients de Thiessen. ....	76
4.3	Résultats des trois méthodes précédentes.....	76
5	Variabilité temporelle des précipitations.....	76
5.1	Variabilité interannuelle des précipitations.....	78
5.1.1	Résultats issus de l'indice de Nicholson.....	78
5.1.2	Détection des ruptures au sein des séries pluviométriques annuelles.....	80
5.1.3	Analyse des tendances des séries pluviométriques annuelles.....	83
5.1.4	Analyse fréquentielle des pluies annuelles.....	85
5.2	Variabilité saisonnière des précipitations.....	87
5.2.1	Détection des ruptures au sein des séries saisonnières.....	88
5.2.2	Analyse des tendances saisonnières des précipitations.....	90
5.3	Régime mensuel de la pluviométrie.....	92
5.3.1	Analyse fréquentielle des précipitations mensuelles (régime pluviométrique probable).....	93
5.3.2	Détection de ruptures au sein des séries de données mensuelles.....	95
5.3.3	Tendance générale des séries pluviométriques mensuelles.....	96
5.4	Résultats issus des données pluviométriques journalières.....	99
5.5	Analyse des pluies journalières maximales.....	100
6	Variabilité thermique du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	106
6.1	Variabilité des températures moyennes annuelles.....	106
6.1.1	Étude des tendances thermiques annuelles.....	109
6.1.2	Détection des ruptures au sein des séries des températures moyennes annuelles.....	110
6.2	Variation des températures moyennes saisonnières.....	112
6.2.1	Tendances des températures saisonnières.....	114
6.2.2	Détection des ruptures dans les séries saisonnières.....	116
6.3	Analyse des températures moyennes mensuelles.....	118
6.3.1	Régime thermique probable.....	118
6.3.2	Tendances des températures mensuelles.....	122
6.4	Tendance des indices issus des températures moyennes journalières.....	123
7	Estimation de l'évapotranspiration.....	124
7.1	Estimation de l'ETP mensuelle.....	125
7.2	Estimation de l'évapotranspiration réelle théorique ETR.....	127
7.2.1	Méthode de Coutagne (1954). ....	128
7.2.2	Méthode de Turc.....	128
	Conclusion du chapitre.....	130

---

**CHAPITRE III : VARIABILITE HYDROLOGIQUE DE L'OUED MELLOULOU ET PHASES HYDROLOGIQUES EXTREMES**

---

	Introduction du chapitre.....	133
1	Données hydrométriques.....	133
1.1	Stations hydrométriques installées dans le bassin.....	133
1.2	Séries des données hydrométriques disponibles.....	134
2	Analyse des modules annuels des débits.....	136
2.1	Méthode des écarts à la moyenne. ....	139
2.2	Méthode de CUSUM.....	141
2.3	Coefficient d'Hydraulicité.....	143
2.4	Coefficient d'immodération.....	143
2.5	Détection des ruptures.....	144
2.6	Etude de tendances hydrologiques des modules annuels.....	144

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

2.6.1	Résultats du test classique de Mann-Kendall.....	145
2.6.2	Test séquentiel de Mann-Kendall.....	145
2.7	Analyse fréquentielle des modules annuels.....	146
2.8	Lame d'eau écoulee et estimation des pertes.....	148
2.9	Débits spécifiques.....	149
3	Régimes hydrologiques des débits.....	149
3.1	Régime saisonnier des débits.....	150
3.1.1	Détection des anomalies dans les séries saisonnières.....	151
3.1.2	Détection des points de changement au sein des séries saisonnières.....	151
3.1.3	Tendances des modules saisonniers.....	152
3.2	Régimes mensuels des débits.....	152
3.2.1	Coefficient mensuel des débits.....	154
3.2.2	Régimes d'écoulement probables.....	156
3.2.3	Coefficient de variation.....	158
3.2.4	Détection des ruptures.....	158
3.2.5	Test des tendances.....	160
4	Phases hydrologiques.....	161
4.1	Analyse des débits de crues.....	161
4.1.1	Genèse des crues.....	162
4.1.2	Analyse statistique des débits moyens journaliers maximaux (débits de crues).....	162
4.1.3	Tendances et ruptures des séries des QJmax.....	164
4.1.4	Coefficient de puissance de crue de (Pardé, 1949).....	164
4.1.5	Ajustement des QJmax aux lois de probabilité.....	166
4.1.6	Débits estimés/ débits jaugé.....	168
4.1.7	Analyse des séries des débits instantanés maximaux.....	169
4.1.8	Temps de concentration.....	174
4.1.9	Relation pluie-débit.....	175
4.1.10	Décomposition de l'hydrogramme de crue (Quelques concepts).....	176
4.2	Analyse des débits d'étiage.....	177
4.2.1	Genèse des étiages.....	177
4.2.2	Apparition des débits mensuels d'étiage (QMNA).....	178
4.2.3	Variabilité des débits mensuels d'étiage (QMNA).....	179
4.2.4	Débits spécifiques d'étiages.....	181
4.2.5	Débits d'étiage issus de la courbe des débits classés.....	182
4.2.6	VCNd au pas de temps journalier.....	185
4.2.7	Indice de sévérité des étiages (ISE).....	188
5	Variabilité spatiale des écoulements dans le bassin versant.....	190
5.1	Etapas de jaugeage de débit.....	190
5.2	Moulinet hydrométrique.....	191
5.2.1	Eléments principaux d'un moulinet.....	191
5.2.2	Principe de fonctionnement d'un moulinet.....	192
5.3	Conditions de fiabilité des jaugeages de débits.....	192
5.3.1	Choix du site de jaugeage.....	193
5.3.2	Mesure de la largeur de la section transversale.....	193
5.3.3	Détermination du nombre des verticales.....	193
5.3.4	Mesure de la profondeur d'une verticale.....	194
5.3.5	Mesure et détermination de la vitesse moyenne sur une verticale.....	194
5.4	Dépouillement des données.....	194
5.5	Choix des sites de jaugeages dans le bassin de l'Oued Melloulou.....	195
5.6	Exploitation des résultats issus des différents jaugeages.....	196

**Thèse de doctorat intitulée : Hydrologie de l'Oued Melloulou et changements actuels :  
Perturbation des régimes climatiques et pression anthropique**

---

5.6.1	Evolution des débits amont-aval.....	197
5.6.2	Profils hydrologiques.....	198
5.6.3	Rendements hydrologiques des Sous bassins versants.....	201
5.6.4	Débits des principales sources situées dans le bassin.....	202
6	Lac de Tameda : un barrage naturel alimentant le réservoir hydrogéologique.....	205
6.1	Bathymétrie du lac.....	205
6.2	Résultats de bathymétrie.....	206
	Conclusion du chapitre.....	209

---

**CHAPITRE IV : EVOLUTION D'OCCUPATION DU SOL DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED MELLOULOU ET SON IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE**

---

	Introduction du chapitre.....	212
1	Exploitation des eaux dans le bassin versant de l'Oued Melloulou.....	212
1.1	Exploitation peu importante en amont.....	213
1.2	Exploitation intensive des ressources en eau en aval.....	216
2	Périmètre irrigué de Taddart ; une zone agricole basée essentiellement sur les apports de l'Oued.....	223
3	Périmètre irrigué de Guercif, une zone agricole par excellence.....	226
4	Superficie des terres irriguées par les eaux souterraines.....	229
5	Gestion de l'eau agricole.....	232
5.1	Rôle de « Jmaâ » en amont du bassin versant de l'Oued Melloulou.....	232
5.2	Rôle des associations d'usagers des eaux agricoles (AUEA) en aval.....	233
5.2.1	Contraintes des AUEA dans le domaine de la gestion de l'eau.....	234
5.3	Rôle du Caïd dans la gestion de l'eau.....	234
6	Facteurs expliquant l'extension des terres agricoles.....	235
6.1	Coutumes, un facteur important dans l'évolution illégales des terres agricoles.....	235
6.2	Rôle du Plan Maroc Vert.....	235
7	Dynamique des terrasses agricoles sur les terrasses fluviales.....	236
7.1	Dynamique des terrasses agricoles.....	236
7.2	Facteurs causaux de la dynamique des terrasses agricoles.....	238
7.2.1	Facteur hydroclimatique.....	238
7.2.2	Rôle de l'anthropisation dans la dynamique du cours d'eau.....	239
7.2.3	Déracinement de la ripisylve rendent les terres exposées aux courants fluviaux.....	239
7.2.4	Rôle de la lithologie.....	240
	Conclusion du chapitre.....	240

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>242</b>
---------------------------------	------------

<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>249</b>
---------------------------	------------

<b>ANNEXES.....</b>	<b>263</b>
---------------------	------------

<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>290</b>
-------------------------------	------------

<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>297</b>
--------------------------------	------------

<b>LISTE DES PHOTOS.....</b>	<b>300</b>
------------------------------	------------

<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>302</b>
--------------------------------	------------