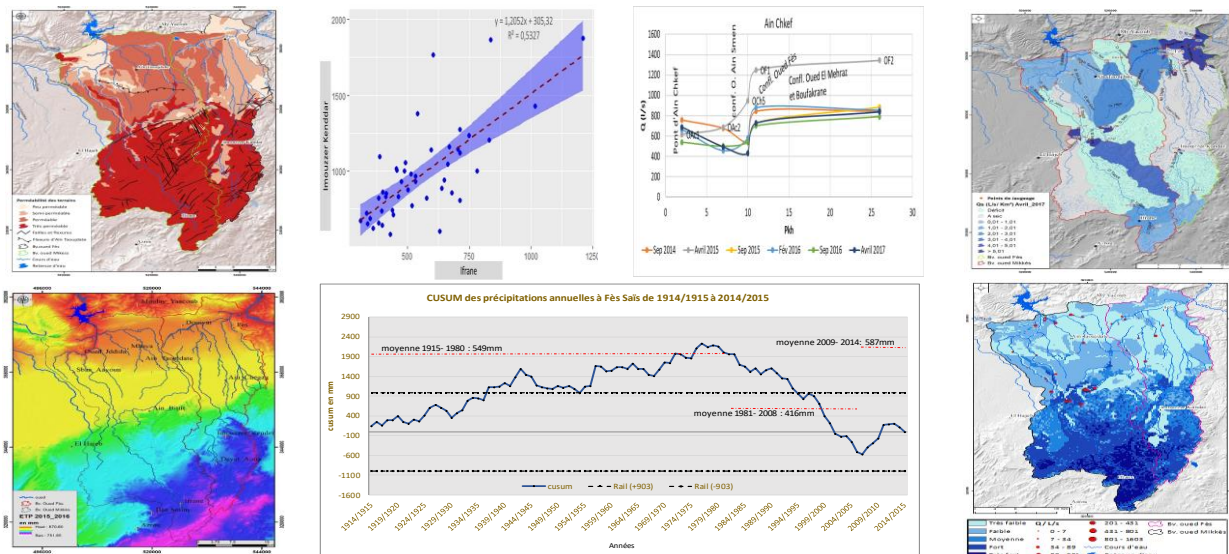


Centre d'Etudes Doctorales : Langues, Patrimoine et Aménagement du Territoire (LAPATER)
Option : Aménagement du Territoire
Laboratoire D'Analyses Géo-Environnementales et d'Aménagement – Développement Durable
(LAGEA-DD)

Thèse de doctorat en géographie physique intitulée :

Hydrologie des oueds Fès et Mikkès drainant le plateau de Saïss et ses bordures moyennes atlasiques

Qadem Zohair



Présentée et soutenue à Fès le 21 Juillet 2020

Membre de jury :

M. Mhamed AMYAY	FLSH, Fès-Saïs	Président
M. Abdelkader EL GAROUANI	FST, Fès	Membre
M. Younes EL KHARIM	FS, Tetouan	Membre
M. Khalid OBDA	FLSH, Fès-Saïs	Encadrant

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I :

PALEOGEOGRAPHIE ET CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES
2. GEOLOGIE DES DEUX BASSINS : TROIS UNITES STRUCTURALES
3. RECONSTITUTION DES EVENEMENTS PALEOGEOGRAPHIQUES : DU TORTONNIEN A L'ACTUEL
4. UNE LITHOLOGIE DIVERSIFIEE CONTROLANT L'INFILTRATION DANS LES DEUX BASSINS VERSANTS
5. PRESENTATION DES BV OUEDS FES ET OUED MIKKES ET LEURS SOUS-BASSINS VERSANTS
6. ANALYSE MORPHOMETRIQUE DES BASSINS VERSANTS
7. TOPOGRAPHIE ET ENERGIE DE RELIEF DES BASSINS VERSANTS
8. LES CARACTERISTIQUES HYDROMORPHOMETRIQUES DES BVS DES OUEDS FES ET MIKKES
9. OCCUPATION DU SOL ET PERMEABILITE DES TERRAINS

CONCLUSION DU CHAPITRE

CHAPITRE II :

CONTRASTES SPATIO-TEMPORELLES DES FACTEURS CLIMATIQUES ET LEURS INFLUENCES SUR LE BILAN HYDRIQUE

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. CONTEXTE DU RESEAU DES STATIONS ET POSTES D'OBSERVATIONS CLIMATIQUES
2. CRITIQUE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES : HOMOGENEISATION ET COMBLEMENTS DES LACUNES
3. VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS
4. ANALYSE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS
5. ANALYSE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES
6. RELATIONS ENTRE LES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES ET LA TOPOGRAPHIE
7. LE CONTRASTE SPATOTEMPOREL DES TEMPERATURES
8. LES INDICES D'ARIDITE DANS LES DEUX BASSINS ETUDIES
9. EVAPOTRANSPIRATION

CONCLUSION DU CHAPITRE

CHAPITRE III :

QUANTIFICATION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE : METHODES ET TECHNIQUES DE MESURES ET SPATIALISATION

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. QUELLE APPROCHE POUR COMPRENDRE L'HYDROLOGIE DE SURFACE DES DEUX BASSINS ETUDIES ?
2. METHODES ET TYPES DE MESURES DES DEBITS
3. METHODE DE JAUGEAGE ADOPTEE : EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES
4. PROCEDE DE L'ACQUISITION DES DONNEES HYDROMETRIQUES VIA LA METHODE
5. DELIMITATION ET CODIFICATION DES POINTS DE MESURES DANS LES DEUX BASSINS ETUDIES
6. QUANTIFICATION DES ECOULEMENTS DE SURFACE DANS LES BASSINS VERSANTS ETUDIES
7. L'ETUDE DE LA VARIATION SPATOTEMPORELLE DES ECOULEMENTS DE L'AMONT VERS L'AVAL
8. SPATIALISATION DES RENDEMENTS HYDROLOGIQUES : CARTOGRAPHIE DES DEBITS SPECIFIQUE

CONCLUSION DU CHAPITRE

CHAPITRE IV :

POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE : COMPORTEMENT, VARIATIONS, EXPLOITATION ET PERCEPTION

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. PRESENTATION DU POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE
2. TROIS NAPPES HYDROGEOLOGIQUES INFLUENCENT L'HYDROSYSTEME DES DEUX BASSINS VERSANTS
3. FLUCTUATION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE : INFLUENCE DES APPORTS PLUVIOMETRIQUES
4. CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES POUR LE STOCKAGE DES EAUX SOUTERRAINES
5. PRESENTATION DES SOURCES LOCALISEES DANS LES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES
6. HISTORIQUE DES MESURES DE DEBITS ET ETUDES DES SOURCES DANS LA ZONE D'ETUDE
7. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DES PRINCIPALES SOURCES DE LA ZONE D'ETUDE
8. COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES SOURCES DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIES
9. RELATION PLUIE-DEBIT DES SOURCES DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIE
10. PHENOMENE DE TURBIDITE DES EAUX DES SOURCES
11. EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU
12. PERCEPTION DES RIVERAINS ET VISITEURS VIS-A-VIS DU PAYSAGE HYDRAULIQUE

CONCLUSION DU CHAPITRE

CONCLUSION GENERALE

HYDROLOGIE DES OUEDS FES ET MIKKES DRAINANT LE PLATEAU DE SAISS ET SES BORDURES MOYENNES ATLASIQUES

RESUME

De nos jours, la plupart des hydrosystèmes marocains sont très sensibles aux effets des changements climatiques. En effet, plusieurs bassins versants ont subi un dérèglement de leur comportement hydrologique, manifesté par la diminution des leurs réserves hydriques. L'oued Fès et l'oued Mikkès drainent deux bassins versants limitrophes couvrant respectivement 879 km² et 1513 km² et appartenant à trois unités morphostructurales différentes : le Moyen Atlas au sud, les rides du Prérif au nord et le plateau de Saïss au centre. Cette thèse a pour objectif de comprendre l'hydrologie de ces deux bassins versants assez complexes et peu étudiés. Pour atteindre cet objectif, le présent travail se base sur une méthodologie de l'hydrologie de base physiques fondée sur quatre niveaux superposés et interactifs, présentés en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est focalisé sur la restitution des principaux évènements paléogéographiques responsables de la situation actuelle des caractéristiques physiographiques. Ces dernières sont analysées minutieusement, afin de tirer leur influence sur le comportement hydrologique des deux bassins versants étudiés. À partir de cette analyse, il a été démontré que les réponses hydrologiques des deux bassins versants étudiés ne peuvent être que faible face aux différentes sollicitations pluviométriques.
- Le deuxième chapitre se base sur l'analyse du facteur climatique du fait qui joue un rôle déterminant les caractéristiques générales des hydrosystèmes des bassins versants. Dans cette étude, l'accent est mis sur les fluctuations et les variations des facteurs climatiques qui sont assez différentes entre l'amont et l'aval. L'étude des précipitations, des températures et de l'évapotranspiration donne de bons indices concernant la différence des bilans hydriques excédentaire en amont et déficitaire en aval des deux bassins versants étudiés.
- Le troisième chapitre est focalisé sur l'hydrologie de surface. Face à l'indigence des données hydrométriques, l'approche adoptée dans cette étude est basée sur les méthodes et techniques de jaugeage, afin de produire des données essentielles pour quantifier et analyser les différents aspects des écoulements de surfaces, à savoir : l'évolution des débits entre l'amont et l'aval, les rendements hydrologiques des sous-bassins versants, la répartition spatiale des débits spécifiques...etc. Dans cette étude, il a été démontré que malgré que l'amont soit le plus arrosé, les écoulements en aval sont beaucoup plus importants à cause de l'influence du facteur hydrogéologique.
- Le dernier chapitre s'intéresse à l'influence du facteur hydrogéologique sur l'hydrosystème des bassins versants des oueds Fès et Mikkès. Cette étude a été basée, sur l'analyse de caractéristiques des nappes hydrogéologiques via la fluctuation de leurs niveaux piézométriques et leur relation avec les apports pluviométriques. Dans un deuxième temps, cette étude mis l'accent sur les échanges de ces nappes avec les écoulements de surface via les sources. Ces dernières sont bien étudiées dans cette thèse, afin de dégager les principales conclusions par rapport à leurs régimes hydrologiques.

A la fin de cette thèse, le facteur anthropique a été intégré dans cette analyse, en se basant sur les aspects de l'exploitation des ressources eau ainsi que la perception vis-à-vis des paysages hydrauliques dans le périmètre urbain de Fès comme étude de cas.

Mots clés : Causses Moyens Atlasiques, plateau de Saïss, bassins versants, oued Fès, oued Mikkès, Climat, Hydrologie, Hydrogéologie

HYDROLOGY OF THE OUEDS FEZ AND MIKKES DRAINING THE SAÏSS PLATEAU AND ITS MIDDLE ATLAS BORDERS

ABSTRACT

Today, most Moroccan hydrosystems are very sensitive to the effects of climate change. Indeed, several catchments have undergone a disturbance in their hydrological behavior, manifested by the decrease in their water reserves. Oued Fez and oued Mikkès drain two adjacent catchments covering respectively 879 km² and 1513 km² and belonging to three different morphostructural units : The Middle Atlas to the south, the Prerif ripples to the north and the Saïss plateau in the center. The purpose of this thesis is to understand the hydrology of these two fairly complex and little studied catchments. To achieve this objective, this work obtains a multidisciplinary methodology based on four superimposed levels, presented in four chapters :

- The first chapter focuses on the restitution of the main paleogeographic events responsible for the current configuration of the physiographic characteristics. These ones would be analysed in detail, hence, to draw their influence on the hydrological behaviour of the two studied catchments. Based on this analysis, it has been shown that the hydrological responses of the two studied catchments are just weak faced to the different stresses.
- The second chapter is based on the analysis of the climatic factor that determinates the general characteristics of the hydrosystem of catchments. In this study, the focus is on fluctuations and variations in climatic factors which are quite different between upstream and downstream. Analysis of precipitation, temperatures and evapotranspiration give good clues as to the difference in excess water balance upstream and deficit downstream of the two catchments studied.
- The third chapter focuses on surface hydrology. Faced with the paucity of hydrometric data, the approach adopted in this study is based on gauging methods, in order to produce essential data to quantify and analyze the different aspects of surface flows, namely : evolution flows between upstream and downstream, the hydrological yields of the sub-catchments, the spatial distribution of specific flows, etc. In this study, it has been shown that although the upstream is the wettest, the downstream flows are much greater because of the influence of the hydrogeological factor.
- The last chapter deals with the influence of the hydrogeological factor on the hydrosystem of the catchment of oued Fez and oued Mikkès. This study is based on the analysis of the characteristics of the hydrogeological aquifers through the fluctuation of their piezometric levels and their relationship with the rainfall contributions. In a second phase, this study focuses on the exchanges of these aquifers with surface runoff via springs. The latter are well studied in this thesis, in order to draw the main conclusions with regard to their hydrological regimes.

At the end of this thesis, the anthropic factor was intergrated in this analysis, based on the aspects of water resources exploitation as well as the perception vis-à-vis the hydraulic landscapes in the urban perimeter of Fez as a case of study.

Keywords: Atlasic Middle Causses, Saïss plateau, catchments, oued Fez, oued Mikkès, climate, Hydrology, Hydrogeology.

دراسة هيدرولوجية لحوضي واد فاس وواد مكس :من الأطلس المتوسط إلى هضبة سايس

ملخص

في ظل التغيرات المناخية، تعرف الأنظمة المائية المغربية اختلالات عميقة، تظهر من خلال تراجع مواردها المائية بشكل يدعو للقلق. وكمثال لهذه الأحواض، يمثل حوضي واد فاس (879 كلم²) وواد مكس (1513 كلم²) أنموذجين يستحقان الدراسة. فهما حوضين متاخمين، ينتميان لثلاث وحدات مورفوتشكالية وهي: الأطلس المتوسط الهضبي في الجنوب، جبال مقدمة الريف في الشمال ثم هضبة السايس في الوسط. تهدف هذه الأطروحة الى فهم خصائص النظام المائي لهذين الحوضين. من أجل الاحاطة بهذه الاشكالية، تم اعتماد منهجية متعددة المقاربات، مبنية على أربع مستويات مترابطة، بلورت من خلال أربعة فصول:

- ارتكز الفصل الأول على إعادة تركيب مختلف الأحداث الباليوجغرافية المسؤولة عن فرز الخصائص الفيزيوجرافية الحالية للحوضين المدروسين. حيث انتقل النظام المائي لهذين الأخيرين، من نظام بحري الى نظام بحيري ثم قاري انطلاقا من بداية لزمن الرابع. من جهة ثانية، خصص حيز كبير من هذا الفصل من أجل تحليل الخصائص المورفومترية والفيزيوجرافية، مع دراسة وقعها على الاستجابة الهيدرولوجية لهذين الحوضين. وخلصت هذه الدراسة الى كون نظام تصريف الجريان لن يكون الا ضعيف في كلا الحوضين.
- اعتمد الفصل الثاني على دراسة العامل المناخي المسؤول عن تحديد المعالم الكبرى للأنظمة المائية للأحواض النهرية. من خلال هذه الدراسة، تم الاعتماد على تحليل تذبذب مختلف العناصر المناخية، من تساقطات وحرارة وتبخّر. أظهرت هذه الدراسة أن الحوضين يعرفان تباينات مناخية واضحة بين العالية والسافلة، تؤثر بشكل مباشر على الحصيلة المائية التي تعرف عجزا في السافلة وفائضا في العالية.
- تطرق الفصل الثالث الى دراسة خصائص الهيدرولوجية السطحية. بالنظر لشح المعطيات الهيدرومترية، تم اعتماد العمل الميداني من أجل قياس صبيب مختلف المجاري المائية والعيون خلال فترات الشح والفترات الرطبة، بهدف تكميم وتحليل مختلف جواب الجريان السطحي، كتطور الصبيب من العالية نحو السافلة وتكميم المردودية الهيدرولوجية لمختلف الأحواض السفحية. وكخلاصة لهذه الدراسة، تبين أنه بالرغم من أن عالية الحوضين أكثر رطوبة، الا أن الجريان السطحي أكثر أهمية في السافلة.
- استند الفصل الأخير على دراسة وقع العامل الهيدرولوجي على النظام المائي لحوضي واد فاس وواد مكس. حيث تم الاعتماد على دراسة خصائص الفرشات المائية الجوفية، من خلال تراقص سطحها المجعي وعلاقتها بالتذبذبات المطرية. من جهة أخرى، حاولت هذه الدراسة إظهار التفاعلات القائمة بين الموارد المائية الباطنية والسطحية من خلال إنبثاق مجموعة من العيون المائية التي استأثرت بدراسة دقيقة لمختلف جوانب سلوكها الهيدرولوجي (منتظم وغير منتظم).

في نهاية هذه الأطروحة، تم إدراج جوانب تدخل العامل البشري في النظام المائي للحوضين، وذلك من خلال إظهار أوجه استغلال واستعمال الموارد المائية المتاحة، بالإضافة الى دراسة العلاقة بين مشهد الأودية والسكنة المحلية، من خلال أنموذج واد فاس وروافده.

الكلمات المفتاحية: الأطلس المتوسط الهضبي، هضبة سايس، الحوض الهيدروغرافي، واد فاس، واد مكس، الهيدرولوجية، المناخ، الهيدرولوجية.

REMERCIEMENTS

« AL HAMDOLILLAH, TOUT PUISSANT, DE M'AVOIR DONNE LA FORCE
POUR SURVIVRE, AINSI QUE L'AUDACE POUR DEPASSER TOUTES LES
DIFFICULTES ».

Par qui, par où commencer ? Rien ne vaut une sincère reconnaissance envers toutes les personnes qui nous ont épaulés. C'est pour moi un réel plaisir de remercier toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, permis, par leur soutien et leur collaboration de mener à bien ce travail. Voilà pourquoi, nous profitons de ce moment idéal pour nous adresser tout spécialement à :

Mon directeur de thèse, **Khalid Obda**, pour la qualité de leur encadrement tant sur le plan scientifique qu'humain, leur encouragement, leur enthousiasme et leur grande disponibilité au cours de ces années.

Il est également de mon devoir de remercier tous les professeurs du LAGEA. J'insiste à les remercier chacun par son nom : Mr. **Mohamed LAAOUANE** Mr. **Mhamed AMYAY**, Mr. **Ali TAOUS**, Mr. **Abdelatif TRIBAK**, Mr. **Youssef BENBRAHIM**, Mr. **Abdelghani El Houari**, Mr. **Abdelhamid IDRISSE JANATI**.

Je voudrais donc remercier toutes les personnes qui ont m'avoir intégré au projet Toubkal-Volubilis MA/2014/306 ; les professeurs de LAGEA, de La Faculté des Sciences et Techniques à Fès et l'équipe de recherche du Laboratoire Hydrosience à Montpellier (HSM), Merci encore, Mr. **Khalid Obda**, Mme **Naoual Rais**, Mr. **Mustapha Jaali**, Mme. **Marie George-Tournoud** & Mme **Nanée Chahinian** de m'avoir apporté une aide précieuse au cours des différentes étapes, par vos conseils, par votre aide et vos savoir-faire sur le terrain et sur le Labo.

Je tiens aussi à présenter mes remerciements les plus distinguées aux membres de jury ; mes professeurs M. **Mhamed Amyay**, M. **Younes EL Kharim**, M. **Abdelkader EL Garouani**.

Mr. **Abdelghani Qadem**, Mr. **Mohamed Lasri**, Mr. **Hamid Ibrahimi**, et Mr. **Mohamed El Ghachi**, méritent également une attention toute particulière.

A mes parents, mes sœurs, mes frères, à toute ma famille ...

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, les changements climatiques sont devenus une réalité palpable, largement reconnue par la communauté scientifique. À cause de ces nouvelles tendances climatiques, la pénurie des ressources hydriques présente le risque le plus menaçant, et ses effets commencent à toucher plusieurs régions de la planète. Le Maroc_ par sa situation dans la rive sud de la méditerranée_ est très vulnérable face à ces changements climatiques.

Selon le rapport de l'Institut Mondial des Ressources (World Resources Institute (WRI), publié en août 2019, le Maroc figure sur la liste des pays avec un "stress hydrique élevé" (High baseline water stress), ce qui signifie que ses besoins en eau sont supérieurs à ses potentiels hydriques disponibles. Ce même Institut a signalé en 2016 que le Royaume connaîtra un niveau de stress hydrique extrêmement élevé d'ici 2040.

En plus, selon l'ONU, le Maroc est passé de 2500 m³ d'eau disponible par habitant en 1960, à moins de 500 m³/habitant aujourd'hui. Ceci est expliqué par le fait que le Maroc soit soumis à une grande irrégularité interannuelle des précipitations, pouvant se manifester sous forme de sécheresses très aiguës depuis les années 90 jusqu'à 2000, combinées avec une surexploitation des eaux disponibles, ce qui influence profondément la situation des ressources en eau au niveau du Royaume.

En ce qui concerne les études nationales visant des projections avenir des ressources en eau au Maroc, plusieurs rapports sonnent l'alarme. Parmi les études les plus pessimistes, le Ministère de l'environnement marocain a publié en 2014 une étude intitulée « Politique du changement climatique au Maroc », cette étude prévoit une baisse significative des apports pluviométriques oscillants entre 3 et 30% selon chaque région du Royaume, accompagné d'une accélération des phénomènes extrêmes, dont les sécheresses et les inondations, et avec une tendance à la hausse des vagues de chaleur. En outre, les projections climatiques établies par la direction de la météorologie nationale prévoient une augmentation des températures moyennes estivales de l'ordre de 2 à 6 C° et une régression de 20 % en moyenne des précipitations d'ici la fin du siècle.

Cependant, on ne peut pas nier l'impact anthropique sur cette régression que connaissent les ressources en eau au Maroc. En effet, la carence des ressources hydriques au niveau du Royaume peut s'expliquer également par la prédominance de plusieurs secteurs très

consommateurs, notamment l'agriculture qui surexploite les ressources en eau de surface et souterraines au niveau du Maroc.

La zone d'étude : deux bassins versants limitrophes au centre de Sebou

Les oueds Fès et Mikkès drainent deux bassins versants limitrophes appartenant à la partie médiane du bassin versant de l'oued Sebou (Fig.1). Selon l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, ce bassin s'étale sur 40000 km² et draine environ 1/3 des écoulements superficiels du Maroc.

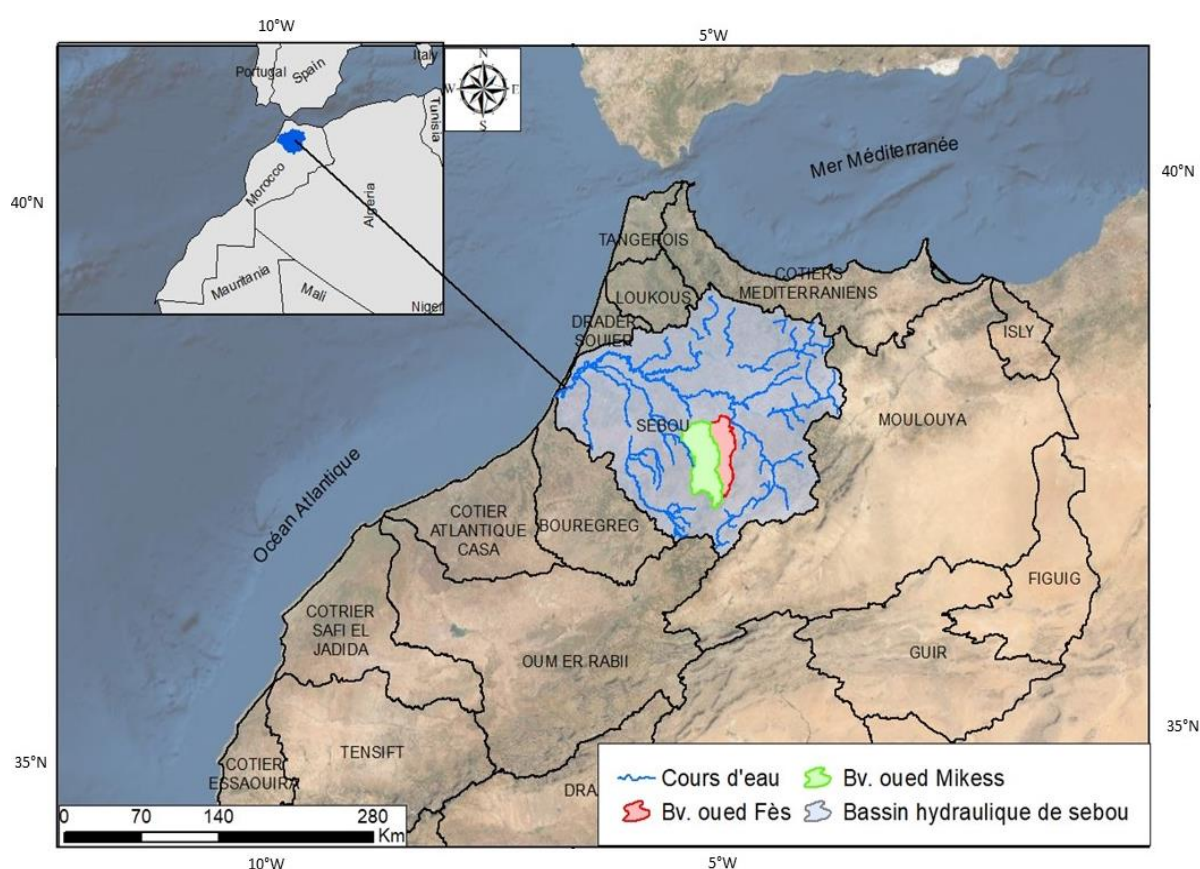


Figure 1: Localisation de la zone d'étude au centre du bassin versant de Sebou

Le bassin versant de Sebou abrite 5.9 millions d'habitants et s'étale sur 17 provinces. Il est le bassin est le plus riche en ressource eau de surface et souterraines au niveau du Maroc. Les apports moyens annuels du bassin s'élèvent à 5560 Mm³ par an (Tab. 1), soit 887 m³/hab. en moyenne (www.hcp.ma). Ses ressources en eau représentent environ 25% du potentiel mobilisable du Maroc (ABHS).

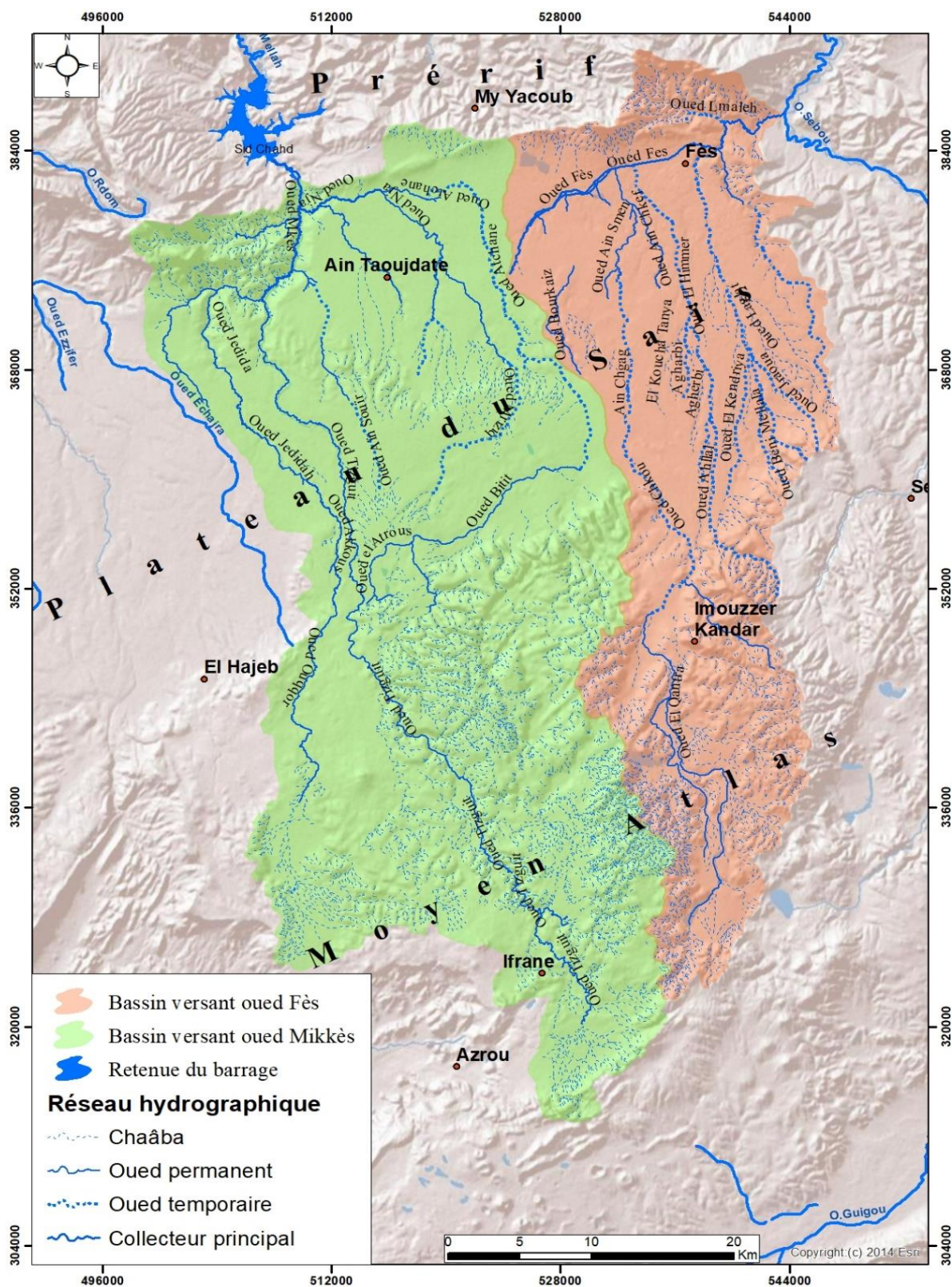
Superficie	40.000 km ²
Altitude Moyenne	695 m
Pluviométrie Moyenne annuelle	600 mm
Apports en eaux de surface	5560 Mm ³ /an
Capacité globale de stockage des barrages	5836 Mm ³ /an
Volume d'eau utilise	3000 Mm ³ /an
- À partir des eaux de surface :	1870 Mm ³ (Irrigation), 30 Mm ³ (AEPI)
- À partir des eaux souterraines :	900 Mm ³ (Irrigation), 200 Mm ³ (AEPI)
Tableau 1: Le bassin hydraulique de Sebou en chiffre	
Source: (ABHS, 2017)	

Comme celles de la surface, les ressources en eaux souterraines du bassin de Sebou sont très importantes. Il contient plusieurs nappes, dont les plus importantes sont :

- La nappe du couloir de Fès-Taza (phréatique et profonde) ;
- Les nappes du bassin du Fès-Meknès (phréatique et profonde) ;
- La nappe de la Mamora ;
- La nappe du Gharb ;
- La nappe de Bou Agba ;
- Les nappes du Causse du Moyen Atlas ;
- La nappe du Moyen Atlas plissé.

Revenons à nos deux bassins versants, ils sont délimités sur un critère topographique. Pour le bassin versant de l'oued Fès, l'exutoire considéré correspond à la confluence de l'oued Fès avec l'oued Sebou. Tandis que l'entrée de la retenue du barrage Sidi Echahed, présente l'exutoire du bassin versant de l'oued Mikkès. Ce dernier s'étale sur 1513 km² et 879 km² comme surface du bassin versant de l'oued Fès. Ces deux bassins versants limitrophes drainent trois unités topographiques (Fig. 2) :

- Le Moyen Atlas tabulaire au sud
- Les collines rifaines au nord
- Le plateau de Saïs au centre.



Sur le plan administratif, les bassins versants de l'oued Fès et Mikkès font partie de la région Fès-Meknès. Selon le dernier découpage de 2015, ils s'étalent sur 10 provinces et 37 communes (Fig. 3).

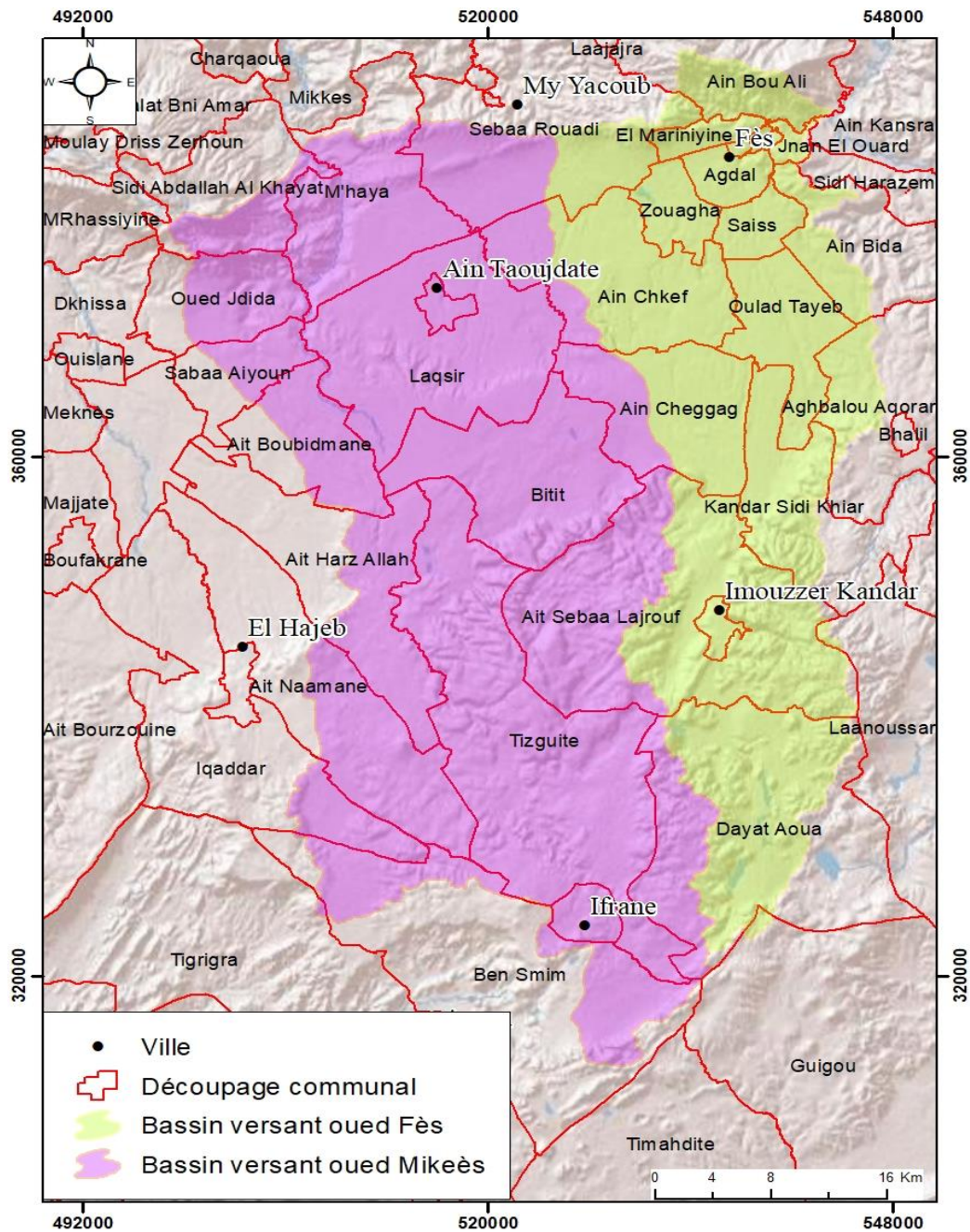


Figure 3: Les unités administratives couvertes par les bassins des oueds Fès et Mikkès

Objectifs de la thèse

Pour comprendre l'hydrologie de ces deux bassins versants limitrophes. Quatre principaux objectifs sont visés dans cette thèse :

- **Reconstituer les principaux évènements paléogéographiques qui ont caractérisé la zone d'étude, puis analyser les facteurs physiographiques actuels des deux bassins versants étudiés.** Cet objectif vise à rassembler et examiner les différents facteurs physiographiques

déterminant le comportement et le fonctionnement hydrologique des deux bassins versants étudiés.

- **Analyser les caractéristiques climatiques des deux bassins versants étudiés.** Pour atteindre cet objectif, la démarche sera basée sur la collecte des données qui seront par la suite critiquées, homogénéisées, organisées et spatialisées ; pour ambition de quantifier l'impact des facteurs climatiques (précipitations, températures et évaporation) sur le bilan hydrique au niveau des différentes parties de la zone d'étude.
- **Quantifier les ressources en eau de surface :** en se basant sur des campagnes de jaugeages pour mesurer les débits des différents oueds drainant les deux bassins versants, en différentes situations hydrologiques (hautes eaux et étiages). Cette opération va nous permettre d'étudier l'évolution des débits entre l'amont et l'aval, ainsi que de quantifier le rendement hydrologique caractérisant les différentes parties des bassins versants des oueds Fès et Mikkès et leurs sous bassins versants.
- **Apprécier la situation du potentiel hydrogéologique** à partir de l'analyse de son système ses échanges et sa variation, tout en prenant en considération les impacts du facteur anthropique et de voir quelle est sa perception vis-à-vis de ces ressources en eau.

Problématique

Le changement climatique influence directement le régime hydrologique, et les formes extrêmes des écoulements des bassins versants en particulier et les hydrosystèmes des espaces naturels en général. Le dérèglement des régimes naturels des cours d'eau et la diminution des réserves hydriques sont parmi les effets les plus fréquents. De par leur appartenance aux domaines arides et semi-arides, la plupart des hydrosystèmes marocains sont très sensibles aux effets des changements climatiques. La zone du Saïss ainsi que ces bordures moyennes atlasiques n'échappent pas à cette situation, due essentiellement à l'irrégularité des apports pluviométriques, ainsi que la surexploitation des eaux de surface et souterraines. En effet, le domaine du Saïss présente une zone de grand potentiel hydrique, malheureusement, très sollicitée par une activité agricole très consommatrice en eau. Il s'étend sur une superficie de 2200 km² et abrite une population qui s'élève à environ 3 millions, dont 28 % dans le milieu rural et 72 dans le milieu urbain (RGPH, 2014).

L'importance des ressources hydriques renouvelable au niveau de cette zone, dépend principalement d'un système d'aquifères bien développés. Ces derniers présentent un capital hydrique pour le développement social, économique et surtout agricole, avec un potentiel d'environ 160 000 hectares, dont 50 000 hectares irrigués (Direction régionale de l'agriculture Fès - Boulemane). Par ailleurs, les villes de Fès et Meknès, ainsi que plusieurs centres urbains et ruraux exploitent une grande quantité des ressources hydriques du plateau de Saïss et ses bordures Moyen Atlasique. Malgré son grand potentiel hydrique, cette zone a connu des années de sécheresses successives, dont les plus marquants sont ceux des années 40, 80, 90 et le début du troisième millénaire. Par conséquent, le bilan hydrique annuel du bassin de Saïss connaît un déficit très prononcé, dans l'ordre de -100 Mm³ an (ABHS). Ce déficit se manifeste par l'abaissement du niveau piézométrique, le recul de l'aire d'artésianisme et tarissement total de plusieurs sources situant dans le plateau de Saïss et ses bordures. Face à cette situation, il faut mettre en place tous moyens visant une gestion rationnelle de ces ressources hydriques et d'affronter le stress hydrique que connaît le Saïss et ses bordures.

Pour cette ambition, il faut tout d'abord comprendre tous les éléments de l'hydrosystème de cette zone attractive. Dans cette optique, cette thèse sera consacrée à l'étude de toutes les composantes de l'hydrosystème de la partie orientale Saïss. Cette zone est alimentée par les écoulements de surfaces et souterrains en prévenance des Causses du Moyen Atlas. Ces eaux drainent deux bassins versants limitrophes, il s'agit du bassin versant de l'oued Fès à l'Est et le bassin versant de l'oued Mikkès à l'Ouest. Ces deux bassins sont peu jaugés, par conséquent, leur comportement hydrologique est très peu connu. **À cet égard, la problématique axiale de cette thèse consiste à étudier l'hydrosystème des deux bassins versants limitrophes, à partir de l'analyse des facteurs physiographiques et climatiques influençant leur comportement hydrologique, ainsi que l'appréciation des eaux de surface et souterraines, en prenant en considération les impacts du facteur anthropique dans le dérèglement de cet hydrosystème fragile. Cette problématique peut être résumée sous forme d'une question, dont quelles sont les facteurs influençant l'hydrologie du Saïss Fès ?**

Méthodes adoptées et démarche suivie

La méthodologie adoptée pour résoudre la problématique est basée sur la quantification des écoulements de surface et mettre en relation avec les facteurs physiques et anthropiques. Il s'agit de caractériser les différents processus et phénomènes hydrologiques dans le Saïss

Fès et ses bordures moyennes atlasiques et prérfaines. Cette méthode s'applique sur trois approches complémentaires.

Pour atteindre les objectifs soulignés ci-dessus, cette thèse adoptera une méthodologie pluridisciplinaire, menée en 3 étapes ; Acquisition des connaissances et données, travail de terrain et enfin l'analyse et l'interprétation de résultats obtenus (Fig. 4) :

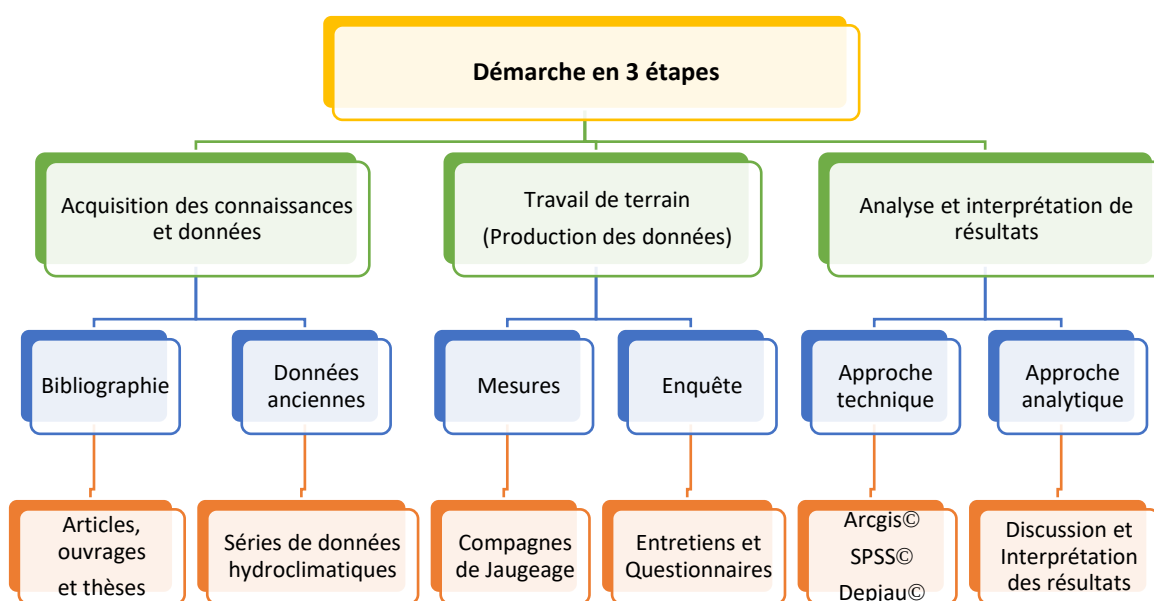


Figure 4: La démarche suivie

- Acquisition des connaissances et données

Cette étape indispensable consiste à synthétiser la littérature (thèses, ouvrages, articles, monographies, rapports administratifs et documents cartographiques) traitant les fondements physiques (géologie, géomorphologie, climatologie, hydrologies) et les caractéristiques anthropiques de l'aire d'étude. Ces connaissances présentent des éléments clés pour comprendre les composantes de l'hydrosystème des deux bassins versants étudiés.

Par ailleurs, beaucoup d'autres connaissances et données (hydrologiques, météorologiques, hydrogéologique, démographiques et activités économiques) ont été acquises à partir d'organismes et services en relation avec la problématique traitée dans cette thèse, à savoir : l'Agence Hydraulique du Bassin de Sebou (ABHS), les Directions Provinciales des Eaux et Forêt et à la Lutte Contre la Désertification et les Directions Provinciales d'Agriculture (DPA).

- Production des données

Cette étape axiale est menée principalement via les travaux de terrain, qui sont orientés principalement à produire des données hydrométriques, à travers 6 compagnes de jaugeages, effectuées sur tous les oueds drainant les bassins de Mikkès et Fès, ainsi que la plupart des sources implantées dans la zone d'étude. En plus de la production de ces données quantitatives, les travaux de terrain ont été destinés également à produire des données qualitatives, via des entretiens et questionnaires avec les acteurs, les usagers et les riverains de l'oued Fès.

- Traitement, analyse et interprétation des résultats

Les méthodes adoptées dans cette étape s'appuient sur deux approches complémentaires :

Une approche techniciste, appuyée le traitement et l'analyse, des données recueillies, à partir de plusieurs logiciels et modèles de traitement des données (XLSTAT, TANAGRA, HYDRACCESS®, R, KHRONOSTAT®, LULU®, DEPJAU®, SPSS®) et d'analyse spatiale et cartographie (ArcGIS® et Global Mapper®).

Une approche analytique, basée sur une analyse superposée et juxtaposée de tous les résultats issus de la première approche, afin d'expliquer les différents facteurs intervenants au niveau de la problématique de cette thèse.

Structure et contenu de la thèse

Cette thèse sera structurée en quatre chapitres. Chaque chapitre à pour objets de répondre à l'un des objectifs soulignés ci-dessus.

Le premier chapitre sera focalisé sur l'analyse des facteurs physiographiques influençant le comportement hydrologique des deux bassins versants étudiés. Ces facteurs actuels sont issus d'une longue histoire paléogéographique qui sera reconstituée dans les premiers axes de ce premier chapitre. Les autres axes viseront à caractériser le comportement hydrologique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès ainsi que leurs sous bassins versants à partir d'une analyse méticuleuse de leurs morphométries, topographies, hydromorphométrie, ainsi que la perméabilité de leurs terrains (lithologie et occupation du sol). Tous ces facteurs physiographiques influencent profondément l'hydrosystème des bassins versants.

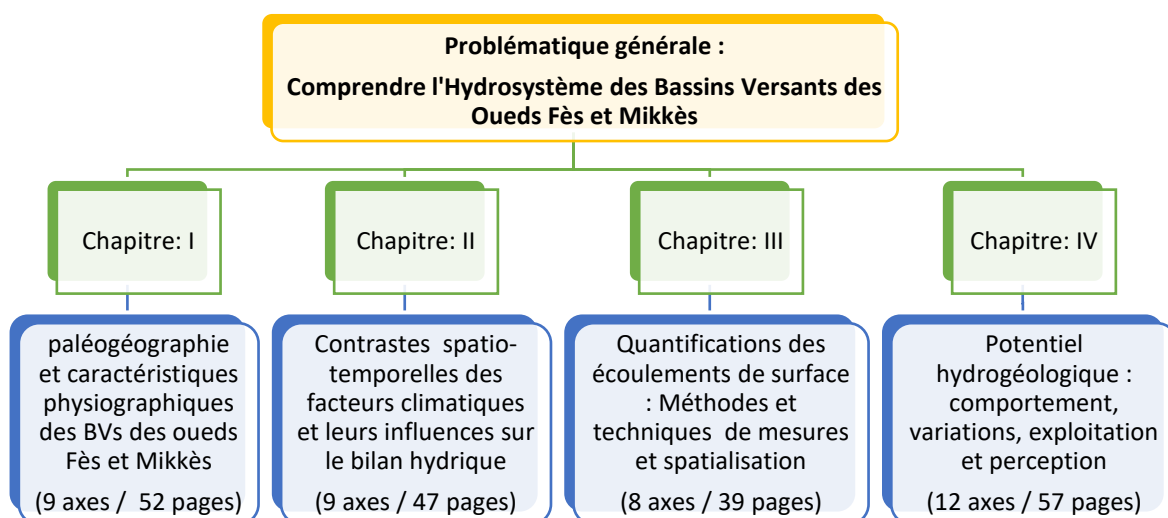


Figure 5: Schématisation du contenu de la thèse

Le deuxième chapitre sera concentré sur le contexte climatique et ses caractéristiques spatiotemporelles. Cette étude est basée sur l'analyse des données issues à partir de 18 stations et postes d'observation climatiques situés dans la zone d'étude et ses périmètres avoisinants. Les premiers axes de ce chapitre seront consacrés à la présentation du contexte climatique général de la zone d'étude, puis la critique des données climatiques obtenues, afin de tester leur fiabilité, d'homogénéiser leurs chroniques et de combler leurs lacunes. Après cette étape préliminaire (mais indispensable), 4 axes seront consacrés à l'étude des variabilités des précipitations, afin de présenter leurs contrastes temporels (interannuels et interannuels) et spatiaux (entre l'amont et l'aval), ainsi que leurs tendances et récurrences. Enfin, les 3 derniers axes vont traiter les températures, les indices d'aridité et l'évapotranspiration, afin de quantifier le bilan hydrique entre l'amont et l'aval des deux bassins versants limitrophes.

Le troisième chapitre sera articulé sur la quantification, l'organisation et la spatialisation des ressources en eau de surface dans les bassins versants de l'oued Mikkès et l'oued Fès. Cette étude est basée sur des mesures de débit en régime stabilisé, non influencé par les apports pluviométriques, en différentes situations hydrologiques. Les premiers axes de ce chapitre seront focalisés sur la présentation des approches méthodologiques en relation avec l'hydrométrie opérationnelle. Il s'agit de mettre en évidence les différentes techniques et méthodes de mesures des débits, puis de présenter la méthode adoptée (exploration du champ des vitesses) et le réseau des points de mesures choisis. Les résultats obtenus à partir

des campagnes de jaugeages effectués entre 2014 et 2017 seront discutés dans les deux derniers axes. Dans un premier lieu, les profils hydrologiques vont nous permettre d'analyser l'évolution cumulative des débits des oueds drainant les bassins versants étudiés de l'amont vers l'aval. Dans un deuxième lieu, la spatialisation des débits spécifiques (via un SIG) va nous donner une idée sur le rendement hydrologique des différents sous bassins versants de la zone d'étude.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'étude des ressources en eau souterraine, à partir de l'analyse du fonctionnement des nappes hydrogéologiques ainsi que leur variation piézométrique et les échanges avec la surface via plusieurs sources au niveau des deux bassins versants étudiés. Une étude minutieuse de ces sources sera envisagée dans ce chapitre, à partir de l'analyse de la variation de leurs débits mesurés par les services compétents. Ces données ont été complétées à partir de plusieurs campagnes de mesures entre 2014 et 2017. Les dimensions anthropiques seront également traitées dans ce chapitre, afin d'approcher l'impact des exploitations sur les ressources en eau, d'une part, et la perception des usagers vis-à-vis de ces ressources en eau à partir d'un questionnaire réalisé sur le périmètre de l'oued Fès, d'autre part.

CHAPITRE I :

PALEOGEOGRAPHIE ET CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES

Sommaire

1. DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES
2. GEOLOGIE DES DEUX BASSINS : TROIS UNITES STRUCTURALES
3. RECONSTITUTION DES EVENEMENTS PALEOGEOGRAPHIQUES : DU TORTONIEN A L'ACTUEL
4. UNE LITHOLOGIE DIVERSIFIEE CONTROLANT L'INFILTRATION DANS LES DEUX BASSINS VERSANTS
5. PRESENTATION DES BV OUEDS FES ET OUED MIKKES ET LEURS SOUS-BASSINS VERSANTS
6. ANALYSE MORPHOMETRIQUE DES BASSINS VERSANTS
7. TOPOGRAPHIE ET ENERGIE DE RELIEF DES BASSINS VERSANTS
8. LES CARACTERISTIQUES HYDROMORPHOMETRIQUES DES BVS DES OUEDS FES ET MIKKES
9. OCCUPATION DU SOL ET PERMEABILITE DES TERRAINS

INTRODUCTION DU CHAPITRE

La configuration actuelle des espaces n'est qu'un résultat de plusieurs millions d'années de mutation de la surface terrestre. En effet, les processus géologiques et géomorphologiques, ainsi que les événements paléogéographiques expliquent l'état actuel des espaces naturels. Quoique les hydrosystèmes soient actuellement très profondément influencé par l'homme, leurs processus et mécanismes globaux sont directement liés aux événements passés. Toutes études visant l'analyse d'un hydrosystème doivent se baser sur l'unité fondamentale des processus hydrologiques : il s'agit du bassin versant. Ce dernier est *l'ensemble d'une zone géographique continentale constituant le bassin hydrographique d'un cours d'eau et correspondant à la totalité de capture et de drainage des précipitations* (Ramade, 1993). En 1974, Loup a défini le bassin versant comme étant *la surface réceptrice des eaux qui alimentent une nappe souterraine, un lac, une rivière ou un réseau complexe. On le définit par sa morphométrie, ses caractères climatiques, sa géologie, sa végétation, ses sols*. D'après les deux définitions précédentes, on peut dire que le bassin versant fonctionne comme un collecteur des précipitations qui les transforment en écoulement à l'exutoire. Cette transformation ne va se produire sans pertes en eau. Ces dernières dépendent des conditions climatologiques régnant sur le bassin versant, mais aussi sur les caractéristiques physiographiques de ce dernier (Roche, 1963).

En ce sens, le présent chapitre sera focalisé, dans un premier lieu, sur la reconstitution des événements paléogéographiques qui ont produit l'hydrosystème de Saïs, notamment sa partie orientale, illustrée par les deux bassins versants limitrophes : Fès et Mikkès. Dans un deuxième temps, l'accent sera mis sur le fonctionnement des deux bassins versants étudiés en se basant sur l'analyse de leurs facteurs physiographiques actuels. Ces derniers présentent le moteur générateur des écoulements et leurs caractéristiques. Cette analyse commence par l'identification de la morphométrie des bassins versants, caractérisée par des indices bien définis. Par ailleurs, une analyse méticuleuse de la topographie des deux bassins sera envisagée. Cette topographie est présentée par les altitudes caractéristiques, à savoir : les dénivelés, les pentes et l'énergie du relief. Cette dernière présente un indice pertinent pour définir le comportement hydrologique des bassins versants. Une attention particulière vise à analyser les caractéristiques hydromorphométriques des deux bassins, notamment la hiérarchisation du réseau hydrographique et la densité de drainage. Pour passer à la fin aux

facteurs physiques influençant la perméabilité des terrains, notamment la lithologie et l'occupation du sol.

1. Délimitation des bassins versants des oueds Fès et Mikkès

Le bassin versant de l'oued Fès à l'est et le bassin versant de Mikkès à l'ouest, prennent naissance au niveau des Causses du Moyen Atlas au Sud. En aval, ils occupent la partie orientale du plateau de Saïs, avant de rejoindre les rides prérifaines au Nord. Étagés du sud vers le Nord, les Causses du Moyen Atlas (Causse de Sefrou, Causse d'Imouzzer, Causse d'El Hajeb & causse d'Ifrane) présentent l'amont des deux bassins versants. Leurs altitudes varient entre 2080 et 900 mètres. Suivant la même inclinaison, l'altitude passe de 900 mètres au Dir, jusqu'à 300 mètres au piémont des rides prérifaines, en traversant le plateau de Saïs.

La délimitation des deux bassins versants a présenté un grand défi, à cause de trois raisons. La topographie quasiment plate par endroit ; la lithologie, parfois, très perméable influençant

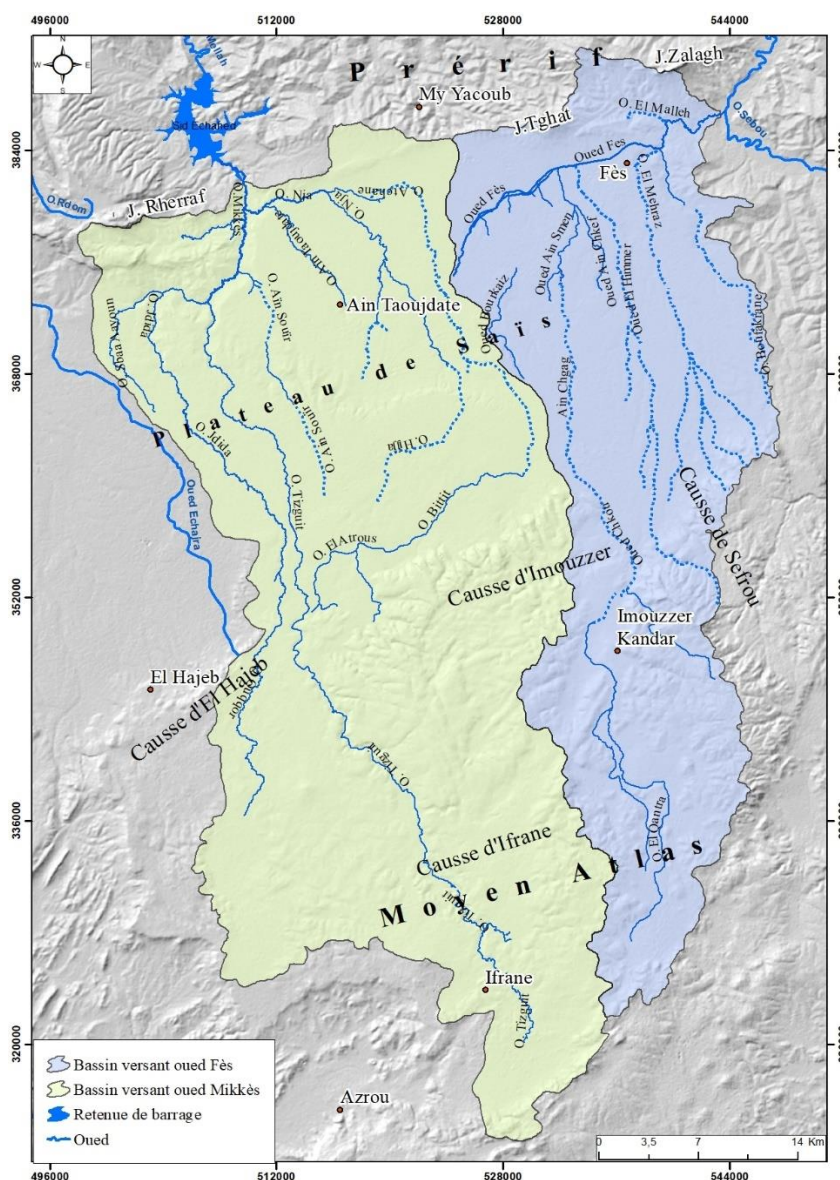


Figure 6: Les bassins versants des oueds Fès et Mikkès

le drainage ; et enfin, les aménagements qui ont complètement bouleversé le système de drainage du réseau hydrographique au niveau des zones agricoles. Face à ces trois contraintes,

le recours aux travaux de terrains a été nécessaire afin de trancher entre les deux bassins limitrophes (Fig. 6). Le bassin versant de l'oued Fès se compose de 5 sous-bassins versants, tandis que celui de l'oued Mikkès est composé de 7 sous-bassins versants. Ces derniers sont récapitulés dans le tableau 2 ci-dessous.

Les sous-bassins versants de l'oued Fès	Superficie (Km²)	Périmètre (Km)
Oued Chekkou	427	158
Oued El Himmer	81	80
Oued Mehraz	138	76
Oued Boufkrane	52,4	63
Oued Malleh	34	27
Les sous-bassins versants de l'oued Mikkès	Superficie (Km²)	Périmètre (Km)
Oued Atchane	457	166
Oued Ain Taoujdate	62	45
Oued N'Ja	153	61
Oued Ain Souir	45	45
Oued Tizguit	430	185
Oued Jedida	430	185
Oued Sebaa Aayoun	20	23
Tableau 2: Les sous-bassins versants des oueds Fès et Mikkès		

2. Géologie des deux bassins : trois unités structurales

Dans ce volet de l'étude, l'accent est mis sur une brève présentation du contexte structural général des deux bassins versants de l'oued Fès et Mikkès. Avant de parler de l'histoire paléogéographique des deux bassins étudiés, la géologie de la zone d'étude est assez complexe. Le bassin de Saïss Fès-Meknès présente la partie centrale du sillon Sud-Rifain, il constitue une dépression qui s'étale de l'Atlantique au niveau de l'ouest et au détroit de Taza à l'est. Ce bassin présente un large synclinal de direction E-W qui s'enfonce progressivement de la partie sud vers nord, et se redresse brusquement au contact des rides prérfaines (Daguin, 1927 ; Amraoui 2005). Sur le plan structural, les bassins versants des oueds Fès et Mikkès appartiennent à trois unités morphostructurales nettement différentes (Fig. 7), ces unités structurales seront étudiées ultérieurement dans ce chapitre :

- Les Causses du Moyen Atlas
- Le plateau Saïs
- Les rides du Prérif

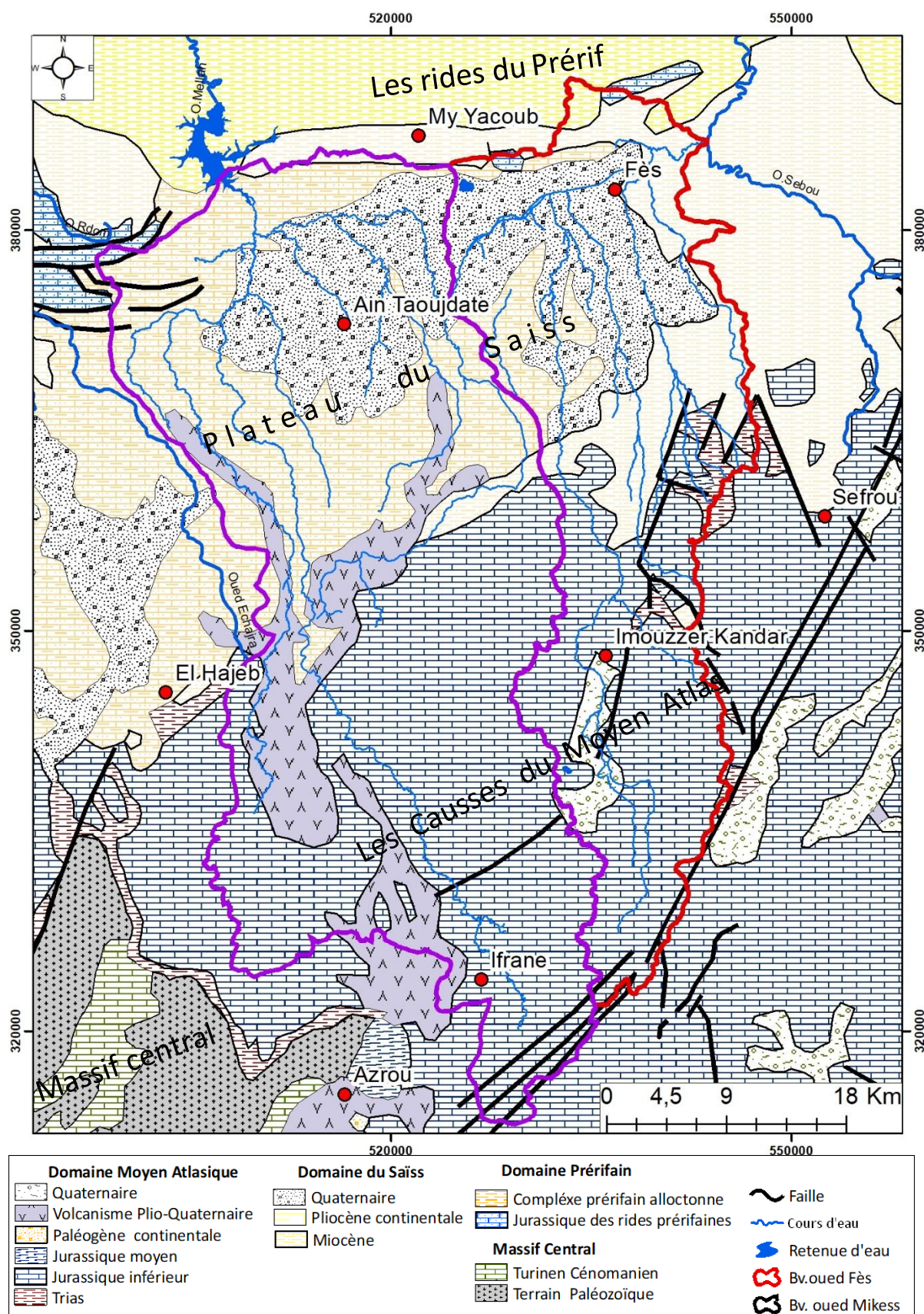


Figure 7: Carte structurale de la zone d'étude et ses bordures

2.1 Causes du Moyen Atlas

Le Moyen Atlas par sa richesse en formation géologique a fait l'intérêt de plusieurs recherches dans ce domaine. Les plus anciennes sont celles de Gentil (1911 et 1916) ; Russo (1921 et 1939) ; Termier (1936) et Colo (1961). Ces recherches ont été reprises et synthétisées par Martin (1981), Fedan (1988), Charrière (1990), Sabaoui (1999), El Arabi (2001) et Hinaje (2004). Les travaux réalisés dans ce domaine, ont permis d'accumuler des connaissances géologiques très intéressantes.

Représentant une chaîne intracontinentale, le Moyen Atlas est bien allongé selon une direction NE-SW, dont, on distingue le Moyen Atlas Plissé et le Moyen Atlas tabulaire. Ce dernier surplombe le plateau de Saïs par un ensemble de plateaux étagés en trois domaines dits : les Causses du Moyens Atlasiques. Ces trois Causses sont celui d'El Hajeb à l'ouest, le Causse d'Imouzzer Kander au centre et le Causse de Sefrou à l'est. Ils s'affaissent plus ou moins brusquement au contact du Plateau de Saïs.

Ces Causses sont dominés par des formations massives d'âge secondaire, caractérisé par des roches calcaire-dolomitiques du Lias, reposant en discordance sur le substratum argileux du Trias (Martin, 1981). Cette situation structurale a favorisé l'abondance des ressources en eau qui alimentent le Saïs, que ce soit sous forme d'eaux souterraines (nappes phréatiques et nappes profondes du Saïs) ou d'eaux de surface par le biais de sources dispersées tout au long du dir et du plateau (Ain Chgag, Ain Bou Rkaiz, Ain Chkef, Ain Smen, Ain Bergama, etc.).

2.2 Plateau de Saïs

Le plateau de Saïs est une dépression de remplissage mio-Plio-Quaternaire surmontant les calcaires et dolomies du Lias et les formations complexes du Dogger. Les formations miocènes sont très épaisses, d'où se développe la nappe liasique profonde du Saïs (Fig. 8). Le Pliocène est caractérisé par deux types de formations : des grès jaunes et des sables du Pliocène marin, et des conglomérats et calcaires lacustres du Pliocène continental (Fassi, 1999 et Taltasse, 1953).

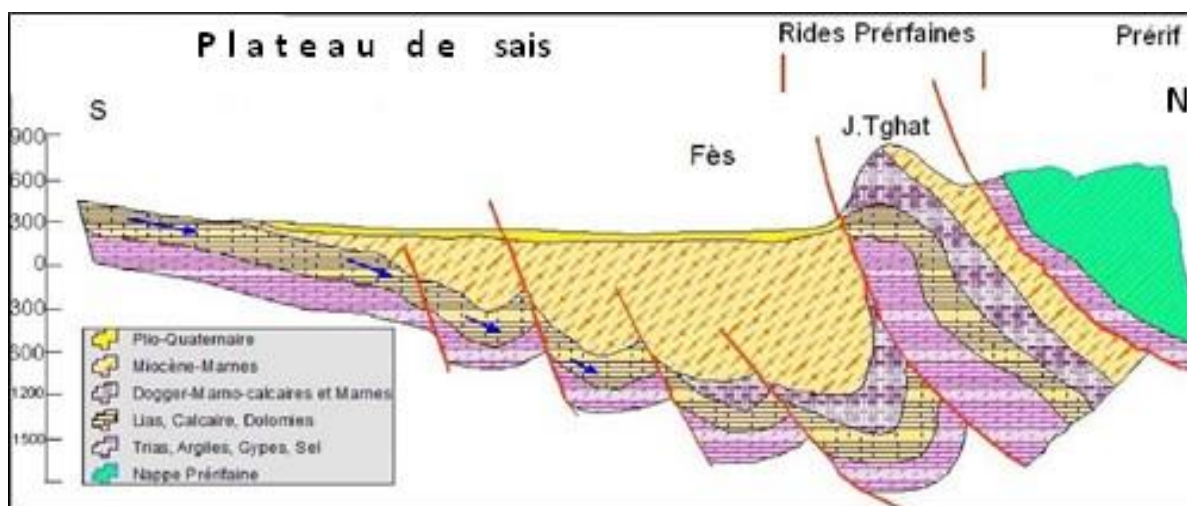


Figure 8: Coupe géologique schématique du bassin Fès-Meknès (d'après : Combe, 1963)

Du point de vue morphostructural, Fassi (1999) distingue entre trois unités topographiques différentes au sein du plateau de Saïs. Il s'agit du plateau de Meknès ; le plateau de Ain Taoujdate et le plateau de Saïs Fès. La première unité topographique (plateau de Meknès) n'est pas drainée par les deux bassins étudiés, à cet égard, ce volet d'étude va s'intéresser uniquement aux plateaux de Saïs Fès et Ain Taoujdate.

2.2.1 Plateau de Saïs Fès

Le plateau de Saïs Fès est une large cuvette ôtée en contre bas du plateau de Meknès par la flexure d'Aïn Taoujdate (Photo. 1). Elle est limitée vers le Nord par les deux structures de Zalagh et Tghat et à l'Est par l'Oued Sebou. La flexure d'Aïn Taoujdate limite l'Ouest du plateau de Fès et se termine dans sa partie orientale en deux branches distinctes.

La branche principale s'amortit au niveau de Aïn Koumbach au pied du causse d'Imouzzer Kander, tandis que



Photo 1: Vue panoramique de du plateau de Saïs Fès (1 avr 2015)

la deuxième branche, qui est de direction SW-NE forme la flexure de Ras El Ma.

2.2.2 Plateau d'Aïn Taoujdate

Limité au Sud-Ouest par la flexure d'Aïn Taoujdate (Photo. 2) et à l'Est par la flexure de Ras El Ma, le plateau d'Aïn Taoujdate est une unité enfoncée entre le plateau de Meknès et le plateau de Saïs-Fès (Fig.9).

Il est drainé par un réseau hydrographique qui se rejoint à l'Ouest et marquant une individualisation de cette partie par rapport à celle de Fès drainée par les affluents de l'oued Fès qui gagne vers l'Est l'oued Sebou.



Photo 2: Flexure d'Aïn Taoujdate

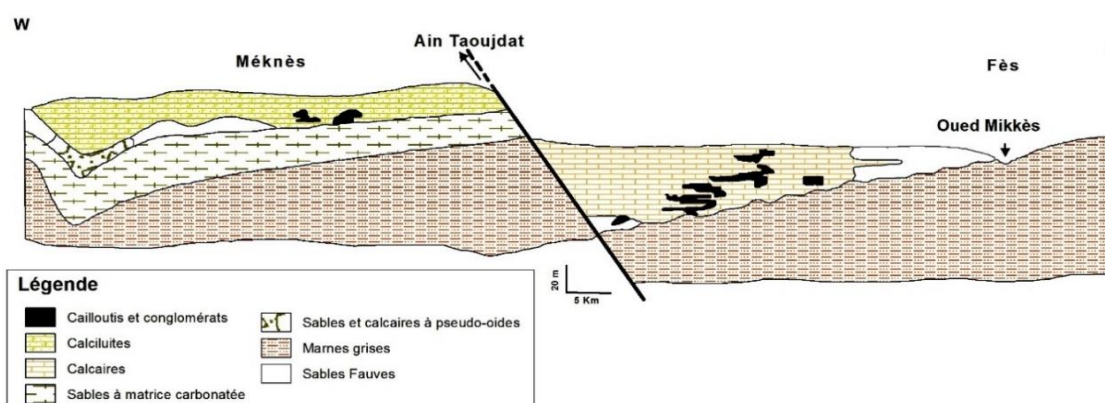


Figure 9: Coupe schématique illustrent les variations latérales de faciès d'est en ouest dans le néogène supérieur du Saïs (D'après, Cirac, 1987).

2.3 Rides du Prérif

Elles présentent la limite nord des deux bassins versants étudiés. Alignées d'une direction E-W, les rides prérifaines présentent une superposition des formations liasiques (calcaires blanchâtres) reposant directement sur le substratum triasique (argiles) (Cherai, 2009).

3. Reconstitution des évènements paléogéographiques : du Tortonien à l'actuel

Comme il a été mentionné plus haut, l'état actuel des espaces naturels traduit une succession de plusieurs évènements paléogéographiques qui ont façonné l'espace et contrôlé les processus déterminant les caractéristiques des systèmes naturels. En ce sens, ce volet de

l'étude vise à reconstruire l'histoire géodynamique et structurale de la zone d'étude, en se basant sur les événements paléogéographiques et leurs répercussions sur l'état actuel de l'hydrosystème des deux bassins versants étudiés.

Dans ce cadre, plusieurs recherches ont bien détaillé l'évolution paléogéographique de la zone d'étude (Taltas, 1953 ; Cirak, 1985 ; Wernli ; 1988). Selon Taltas ; l'affleurement des formations lacustres et de leurs faciès permet de retracer la grande histoire des deux bassins versants et leur évolution paléogéographique. Les principaux événements paléogéographiques peuvent être résumés comme suit :

- **Au Tortonien** : La mer tortonienne se prolonge du bassin de Saïss jusqu'au centre du Moyen Atlas (Charrière, 1984 ; Fedan 1988). Les dépôts marneux ont été très importants.

- **Au Messinien** : On assiste à une réduction de l'épaisseur de la tranche d'eau et ensuite la fermeture du bassin sud-rifain. Ainsi, la régression fini-messinienne a eu pour conséquence une rupture des communications entre la Méditerranée et l'Atlantique par ce bassin. (Cirak, 1985 ; Aït Brahim, 1991).

- **Au Pliocène inférieur** : Cette période a été caractérisée par l'alimentation du bassin par d'importants apports détritiques donnant lieu à la formation de conglomérats et sables à matrice carbonatée.

- **Au Pliocène supérieur** : On assiste à une isolation complète du bassin de Saïs après l'émersion du seuil d'El Kansra. Suite à cet événement, une sédimentation lacustre va caractériser le Saïss durant le Pliocène supérieur (Cirak, 1985).

- **Au Quaternaire** : L'ensemble des dépôts montre que le milieu devient franchement continental (fluvatile).

D'après la reconstitution de ces événements, on peut dire que durant les 11 derniers millions d'années, la zone d'étude est passée d'un espace marin, puis lacustre, pour devenir complètement continental. Cette transition a été accompagnée par plusieurs processus structuraux, hydrodynamiques et morphogéniques donnant naissance à un hydrosystème particulier. En effet, dès la fin du Pliocène, il y a environ 2 millions d'années, l'oued Sebou a emprunté une nouvelle trajectoire, déviant le bassin de Saïs. Par conséquent, ce dernier

commence à sécher, peu à peu, pour donner naissance à un écoulement purement continental, en prévenance des Causses du Moyen Atlas. Dans la partie orientale, les écoulements drainent actuellement le bassin versant de l'oued Fès qui rejoint l'oued Sebou au piémont de Jbel Zalagh. À l'Ouest du bassin versant de l'oued Fès, les écoulements drainent le bassin versant de l'oued Mikkès qui traverse les rides prérfaines (d'où il prend le nom de l'oued Malleh) avant de rejoindre l'oued Sebou un peu plus en bas. Enfin, la partie occidentale de Saïss (n'est pas visée dans cette thèse) est drainée par d'autres oueds traversant le plateau de Meknès, puis rejoignent l'oued Rdom qui alimente la partie aval de l'oued Sebou, juste avant son embouchure dans l'océan Atlantique (Fig.10).

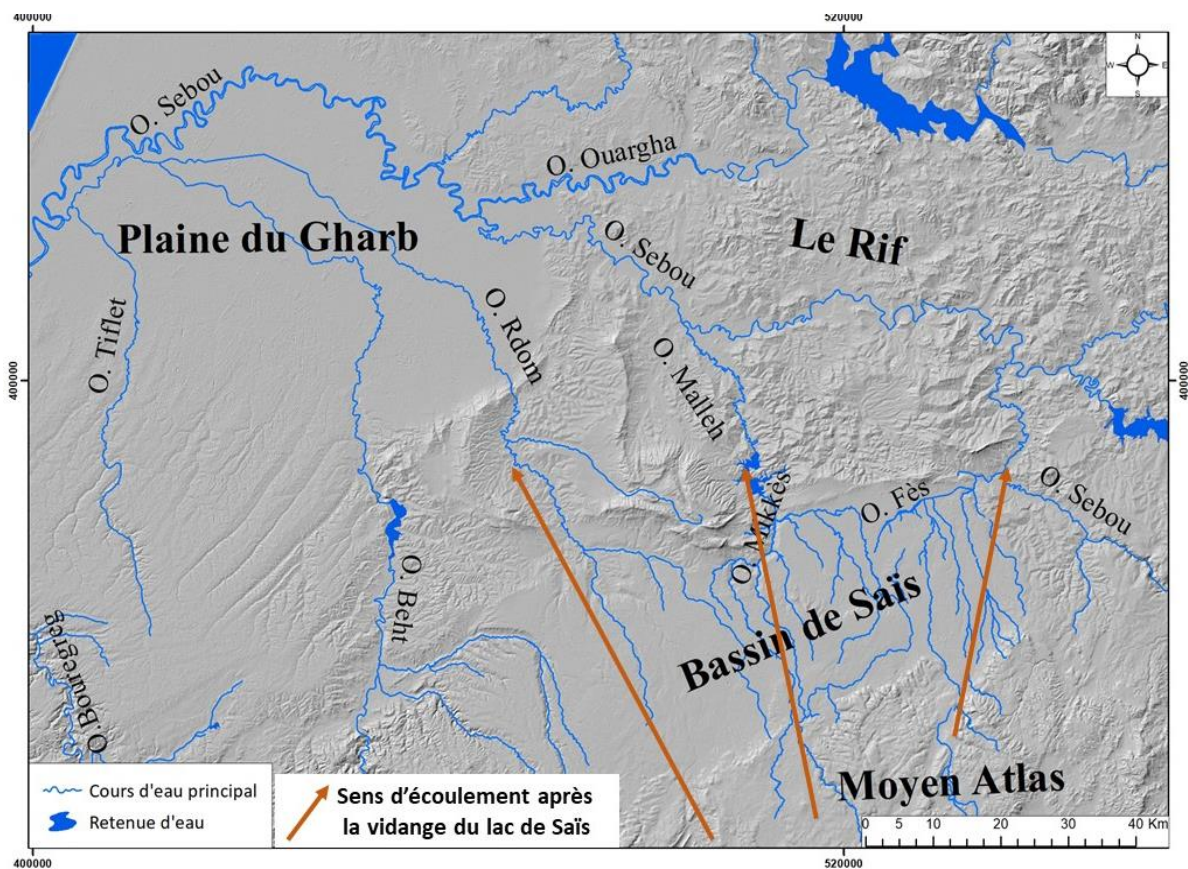


Figure 10: Organisation du réseau hydrographique actuel

Cette brève reconstitution de l'histoire paléogéographique de Saïss, n'est qu'une introduction au vif de notre problématique, visant l'étude de l'hydrosystème des bassins versants des oueds Fès et Mikkès. Ces derniers présentent actuellement, l'héritage d'une longue mutation d'un espace intramontagnard. Dans les prochains axes, l'accent sera mis sur l'analyse des caractéristiques physiographiques des deux bassins versants étudiés, afin de bien comprendre les facteurs physiques influençant leur comportement hydrologique.

4. Une lithologie diversifiée contrôlant l'infiltration dans les deux bassins versants

La lithologie présente un facteur déterminant le comportement hydrologique des bassins versants. Elle joue un rôle décisif dans l'alimentation des nappes souterraines par l'infiltration ou le ruissellement des lames d'eau précipitées si les roches ne sont pas assez perméables. À cause de leur contexte structural et histoire paléogéographique complexe, les bassins versants des oueds Mikkès et Fès sont caractérisés par une lithologie assez diversifiée.

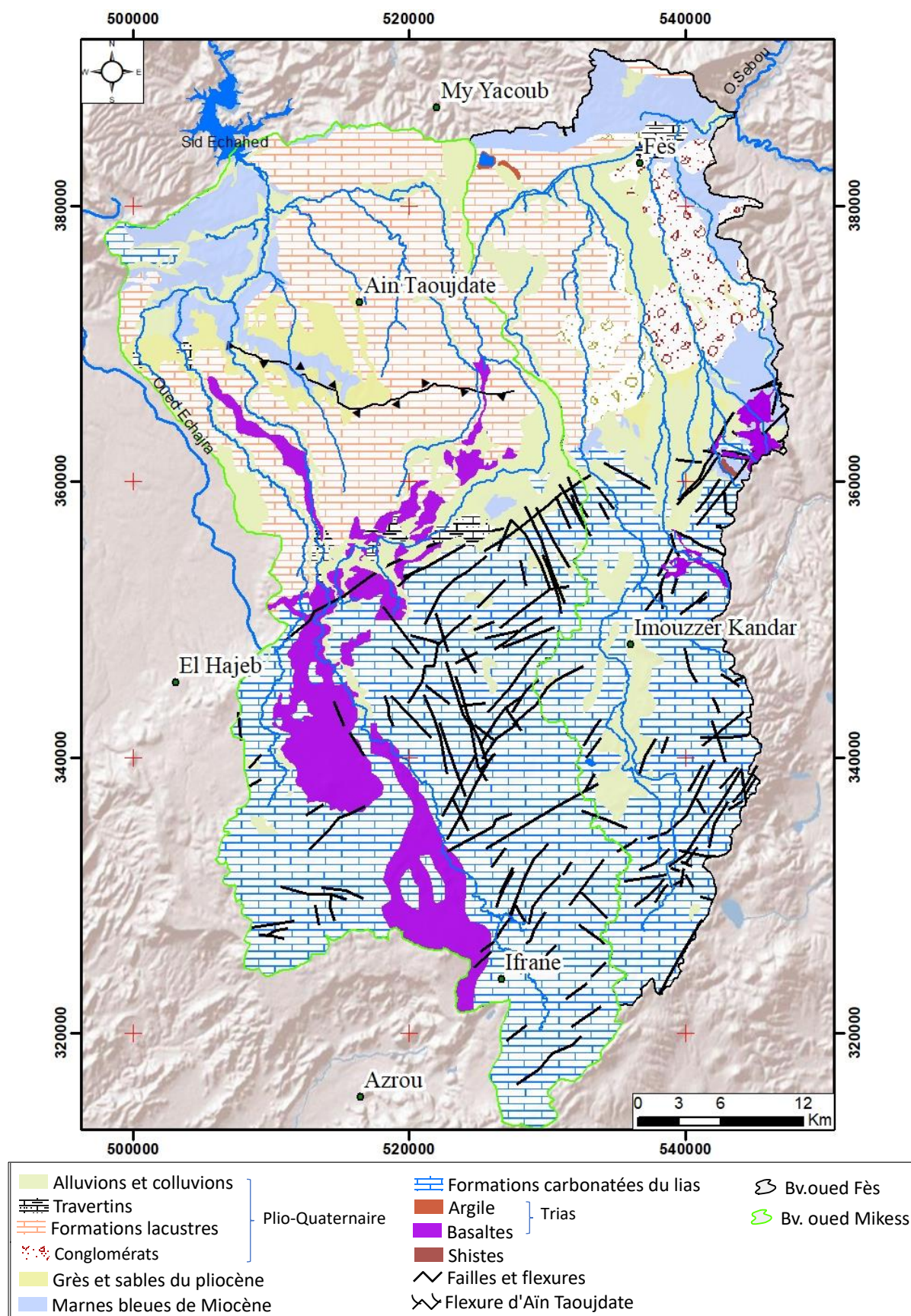
Grace aux cartes géologiques, géomorphologiques, géotechniques et hydrogéologiques couvrant la zone d'étude, on a pu spatialiser les domaines lithologiques caractérisant les bassins versants des oueds Mikkès et Fès (Fig. 11). D'après la carte ci-dessus, on peut dire que les deux bassins se caractérisent par 7 domaines lithologiques majeurs.

Nous commençons par le plateau de Saïs qui est dominé par les calcaires lacustres du Pliocène (Photo : 3). Ces formations occupent la partie occidentale du BV oued Fès et une grande partie à l'aval du BV Mikkès.

Les conglomérats du Pliocène se localisent à l'Est du plateau de Saïs (photo : 5). Leur perméabilité varie en fonction de leur degré de consolidation. Ces formations peuvent atteindre localement une vingtaine de mètres d'épaisseur (Chapond et al. 1960).

Le travertin occupe également une petite partie de l'aval, précisément au niveau de la médina de Fès et sa bordure nord (photo : 8). Cette formation se trouve également au Nord-Ouest de la ville d'Imouzzer.

La quatrième formation caractérisant le Saïs et les rides du Prérif sont les marnes bleues du Miocène (Photo : 7), occupant la vallée de l'oued Boufkrane, le BV El Malleh et la zone de confluence du réseau hydrographique du BV oued Mikkès. En montant vers le Moyen Atlas, on remarque une dominance des formations carbonatée du Lias (calcaires et dolomies).



Ces formations massives sont très fissurées garantissant une grande perméabilité. Les formations basaltiques fini-triasiques coulent de l'amont de l'oued Tizguit, jusqu'à la flexure d'Ain Taoujdate (Photo :24). Ces coulées sont très fissurées et encadrées par des argilites et siltites rouges du Trias supérieur. En fin, il y a le domaine des alluvions Villafranchiennes qui occupent les vallées des oueds non-encaissés et des dépressions karstiques (couloir Dayet-Aoua-Imouzzet) (Lasri, 2015).



Photo 3: Formation du calcaire lacustre (carrière de Bou Rkaiz. (15 fév.2018)



Photo 4: Calcaire au niveau de l'aval de l'oued Tizguit (20 sept. 2015)



Photo 5: Blocks du basalte au niveau du dir. (12 Avr. 2015)



Photo 6: Affleurement des formations conglomératiques d'Ain Chkef (près de la Source Ain Chkef). (3 Mars 2016)



Photo 7: Marne bleu au niveau des rides préifaines. (Déc. 2019)



Photo 8: Travertins au niveau du Borj-nord de Fès .

Afin d'illustrer la perméabilité des terrains drainés, on a essayé de classier les domaines lithologiques de la zone d'étude selon leur degré de perméabilité (Fig. 12). Quatre domaines de perméabilité sont identifiés. Les coulées basaltiques et les calcaires et dolomies du Lias présentent les domaines très perméables à cause de leur grande fracturation. Les calcaires lacustres sont perméables. Les dépôts alluvionnaires et les zones de conglomérats sont semi-perméables. Et enfin, les domaines marneux sont très peu perméables à imperméables.

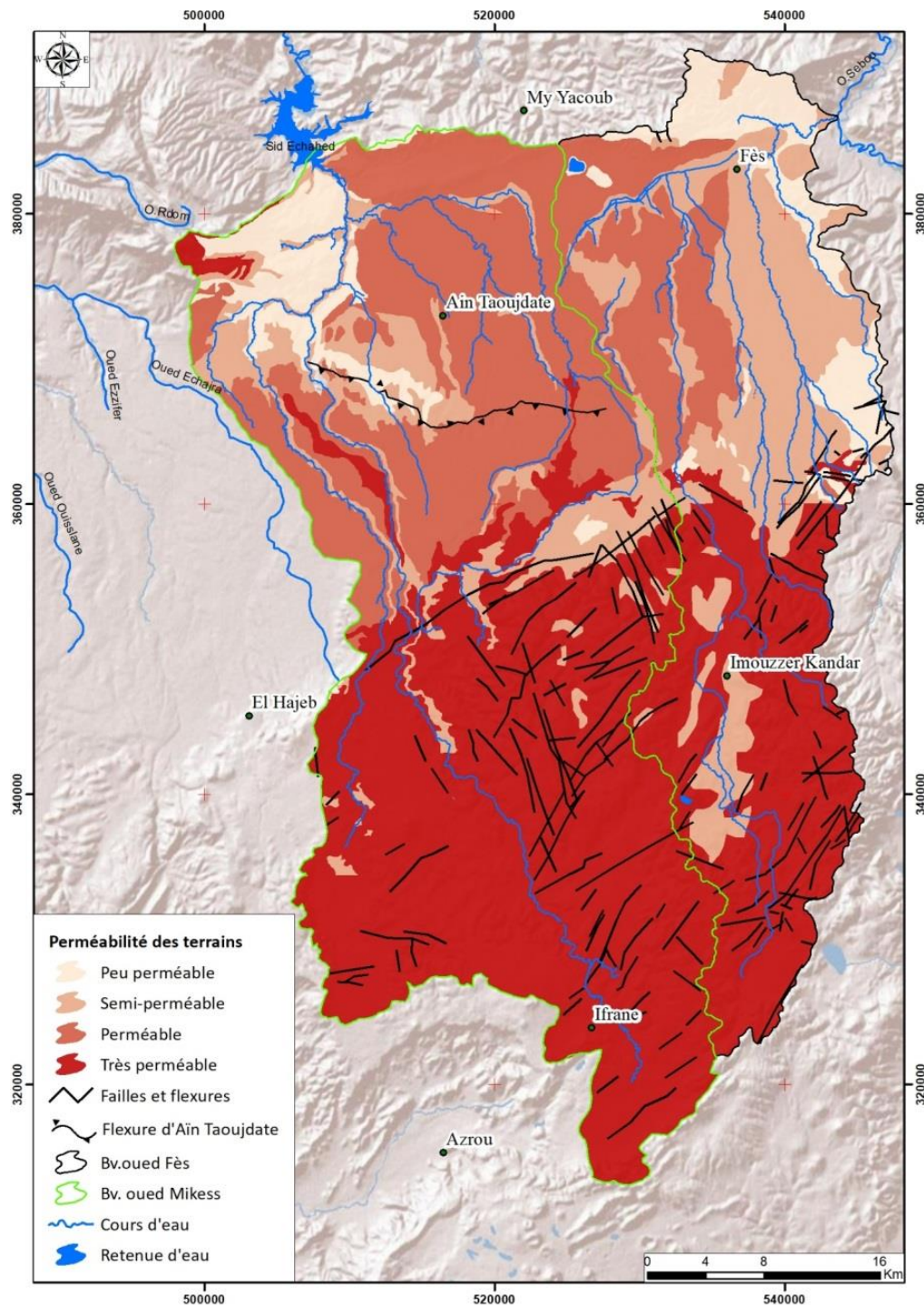


Figure 12: Spatialisation des degrés de perméabilité dans les BVs oued Fès et oued Mikkès

La carte ci-dessus donne une idée sur le contraste des domaines de perméabilité d'un bassin à l'autre. En général, les domaines très perméables présentent presque la moitié de la surface des deux bassins versants limitrophes (46%). Tandis que les domaines peu perméables ne présentent que 9%. Les domaines semi-perméables et perméables couvrent respectivement 19% et 26%.

À l'échelle de chaque bassin versant (Tab.3), 37% des terrains du bassin versant de l'oued Fès sont très perméables, alors que ces zones présentent 57% de la surface du bassin versant de l'oued Mikkès. Les domaines peu perméables occupent 7% de la surface de chacun des deux bassins versants. En ce qui concerne les domaines semi-perméables et perméables, ils couvrent respectivement 41% et 15% de la surface du BV oued Fès et 8% et 28% de la surface du BV oued Mikkès. D'après ces chiffres, on remarque que le bassin versant de l'oued Mikkès se caractérise par une perméabilité beaucoup plus importante que celle du bassin versant de l'oued Fès. En ce qui concerne les sous-bassins versants, certains d'entre eux sont presque totalement perméables, comme le sous bassin versant de l'oued Tizguit, dont les domaines perméables et très perméables atteignent 90% de sa surface. D'autres bassins sont très peu perméables, à l'image du sous bassin de l'oued El Malleh, qui a une surface drainée par 80% des domaines peu perméables (Tab. 3).

Perméabilité	Peu perméable		Semi perméable		Perméable		Très perméable		Sup
Bassins versants	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	(Km ²)
Oued Fès	62	7	360	41	132	15	325	37	879
Oued Boufrane	21	41	31	59	0	0	0	0	52
Oued El Mehraz	30	22	94	68	0	0	14	10	138
Oued El Himmer	2	3	52	64	2	3	24	30	81
Oued Chekkou	17	4	94	22	98	23	218	51	427
Oued El Malleh	27	80	0	0	0	0	7	20	34
Oued Mikkès	106	7	121	8	424	28	862	57	1513
Oued Atchane	96	21	27	6	160	35	174	38	457
Oued N'Ja	0	0	9	6	132	86	12	8	153
Oued Ain Taoujdate	6	9	7	12	49	79	0	0	62
Oued Mehdouma	10	23	17	37	18	40	0	0	45
Oued Tizguit	22	5	22	5	65	15	323	75	430
Oued Jdidda	18	7	8	3	73	29	153	61	250
Oued Sbaa Ayoun	0	0	12	59	8	41	0	0	20
Tableau 3: Surfaces et pourcentages des degrés de perméabilités par rapports aux surfaces des BVs									

En général, la diversité des perméabilités des terrains influence directement le comportement hydrologique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès. D'après les résultats présentés ci-dessus, on peut dire qu'une grande partie des lames d'eau précipitées aura tendance de s'infiltrer au lieu de s'écouler. Ces eaux seront retenues dans les roches perméables, permettant d'alimenter les nappes souterraines, jouant un rôle important dans l'emménagement et la vidange des eaux précipitées. Ce phénomène hydrologique et hydrogéologique sera analysé dans le troisième chapitre.

5. Présentation des BV oueds Fès et oued Mikkès et leurs sous-bassins versants

On rappelle que les bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès occupent respectivement, 879 km² et 1513 km² (Fig. 14 et Fig. 13). Le premier bassin se compose de 5 sous-bassins versants, à savoir : le sous-bassin versant de l'oued Boufkrane (52 km²) (Fig. 15) ; le sous-bassin versant de l'oued El Mehraz (138 km²) (Fig. 16) ; le sous-bassin versant de l'oued El Himmer (81 km²) (Fig. 17) ; le sous-bassin versant de l'oued Chekkou (427 km²) (Fig. 18) et le sous-bassin versant de l'oued El Malleh (34 km²) (Fig. 19). À l'exception de ce dernier, tous les affluents de l'oued Fès regagnent le collecteur principal au niveau de sa rive droite. Ces bassins drainent un réseau hydrographique acheminé parallèlement, du sud vers le Nord. Ils prennent naissance dans les Causses du Moyen Atlas : les oueds Boufkrane et El Mehraz au niveau du causse de Sefrou, El Himmer au niveau du causse d'Imouzzer (le massif du Kenddar) et Chekkou au niveau du causse d'Ifrane. Tous ces sous-bassins versants drainent le plateau de Saïss et rejoignent les oueds Fès au contrebas des rides pré-rifaines, avant de rejoindre l'oued Sebou. Le bassin versant de l'oued Mikkès, quant à lui, est composé de 7 sous-bassins versants qui sont : le sous-bassin versant de l'oued El Atchane (457 km²) (Fig. 20) ; le sous-bassin versant de l'oued N'Ja (153 km²) (Fig. 21) ; le sous-bassin versant de l'oued Ain Taoujdade (62 km²) (Fig. 22) ; le sous-bassin versant de l'oued El Mehdouma (45 km²) (Fig. 23) ; le sous-bassin versant de l'oued Tizguit (430 km²) (Fig. 24) ; le sous-bassin versant de l'oued Jdidda (250 km²) (Fig. 25) et le sous-bassin versant de l'oued Sbaa Ayoun (20 km²) (Fig. 26). La zone de confluence de tous ces bassins versants se trouve 3 Km avant la retenue du barrage Sid Echahed (Photo. 9). Les oueds Atchane, N'Ja et Ain Taoujdade alimentent l'oued Mikkès au niveau de sa rive droite. Tandis que les oueds Sbaa Ayoun, Jdidda, Tizguit et Ain Souir (Bv Mehdouma) alimentent la rive gauche. Les bassins versants des oueds Tizguit, Atchane et

Jdida prennent naissance au niveau des causses d'Ifrane et El Hajeb ; alors que le reste des sous-bassins versants sont alimentés par les sources de débordement et résurgence de Saïs.

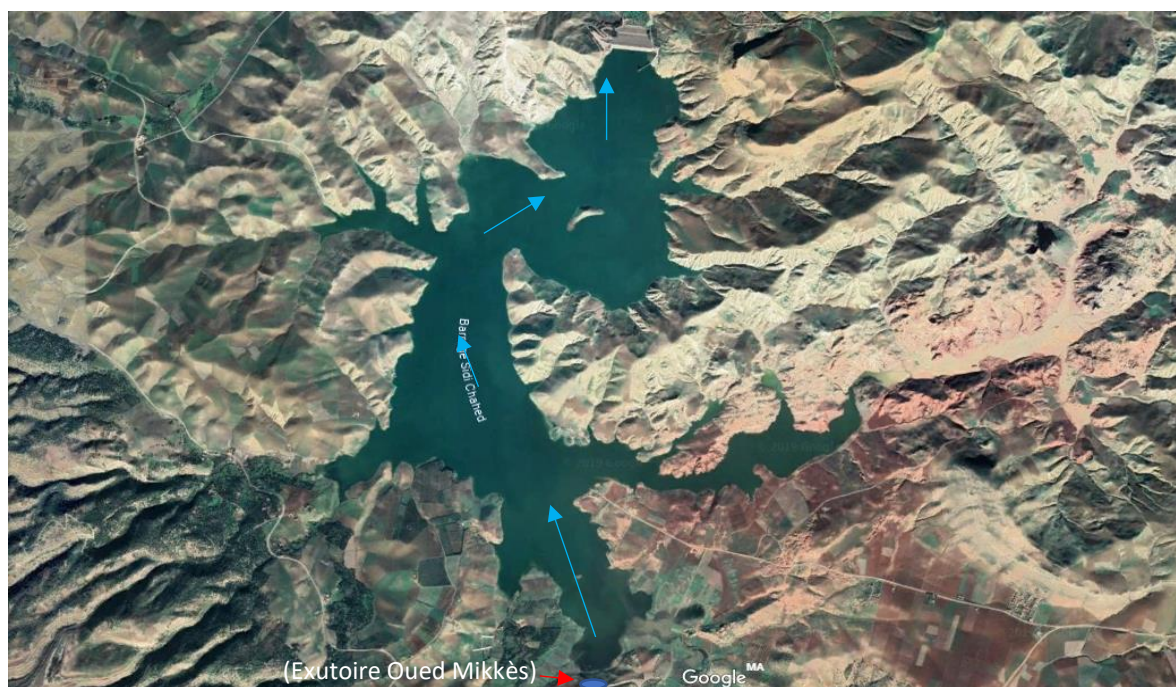


Photo 9: Image satellite du barrage Sid Echahed. (Google Earth, 2019)

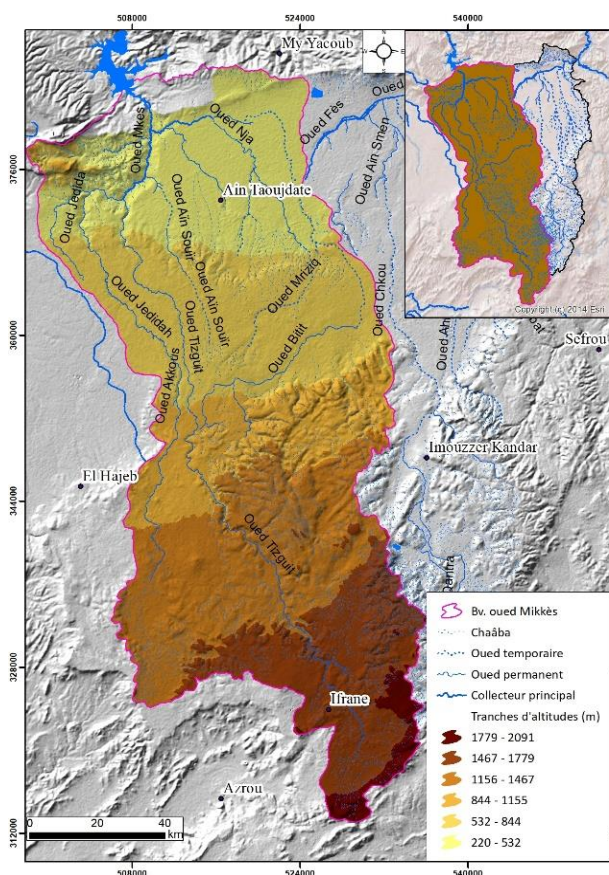


Figure 13: Bassin versant oued Mikkès

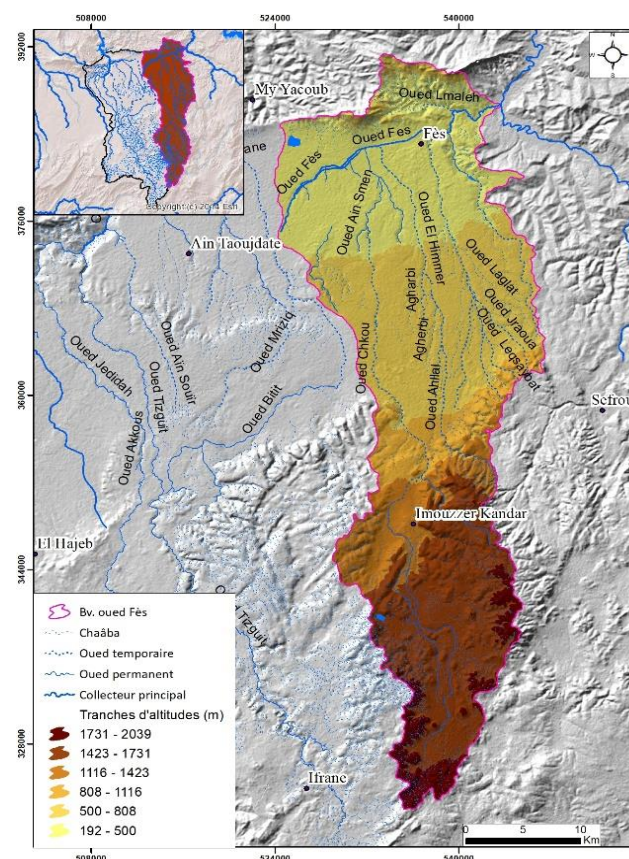


Figure 14: Bassin versant oued Fès

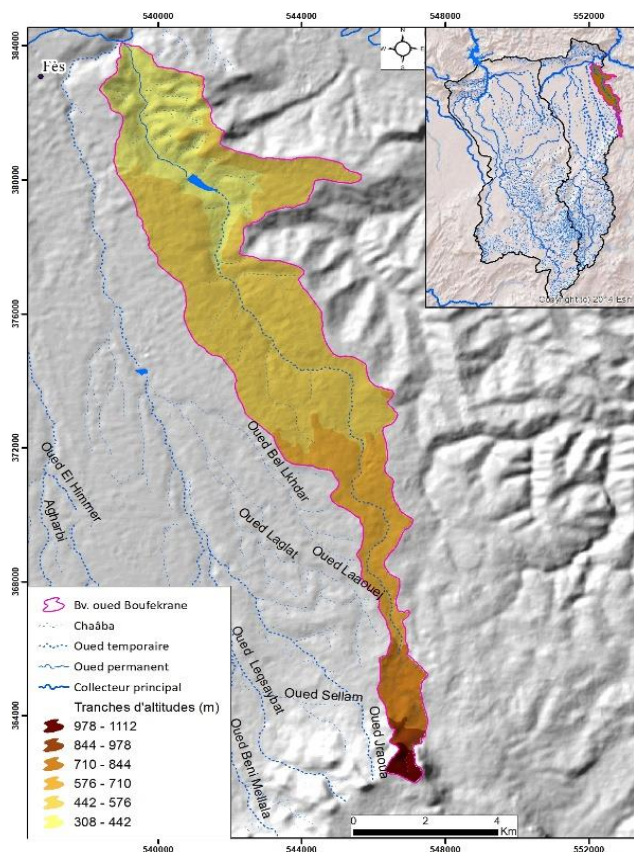


Figure 15: Sous bassin versant oued Boufrane

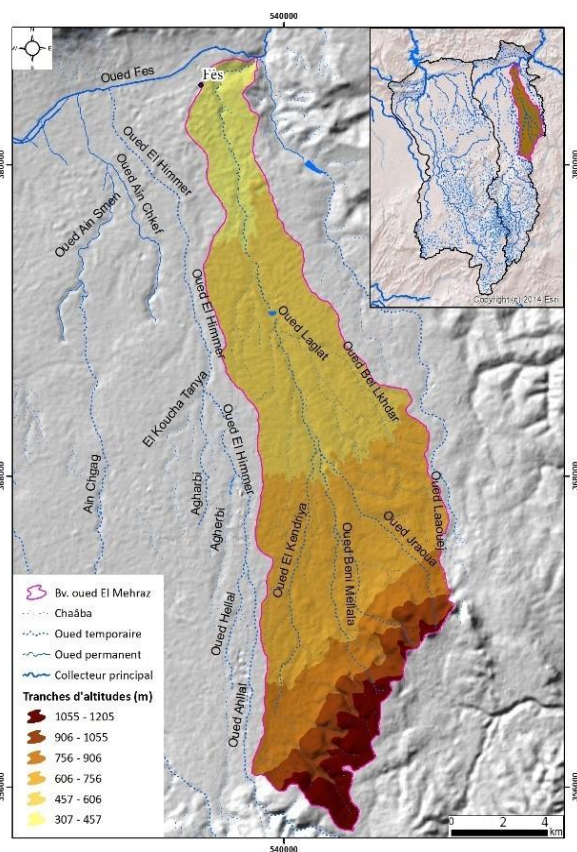


Figure 16: Sous bassin versant de l'oued El Mehraz

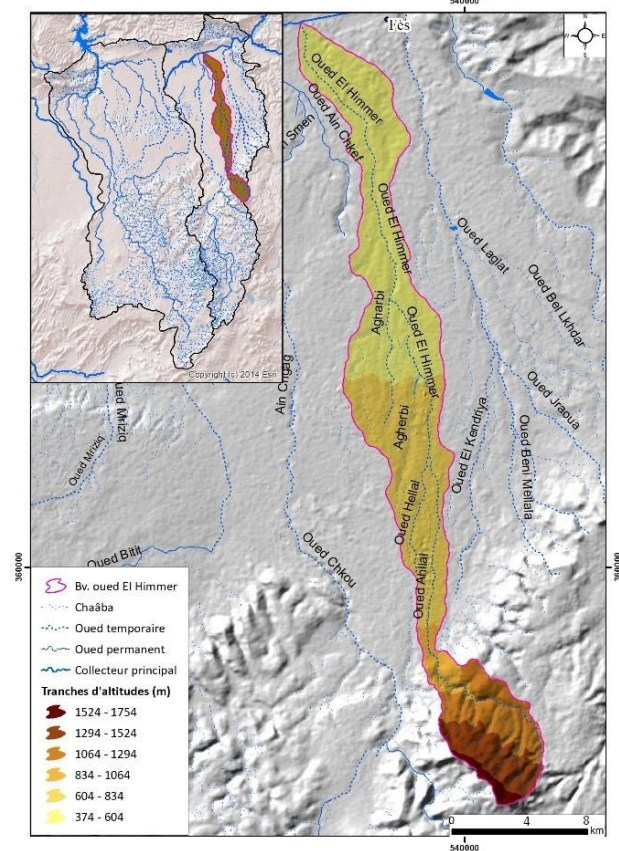


Figure 17: Sous-bassin versant de l'oued El Himmer

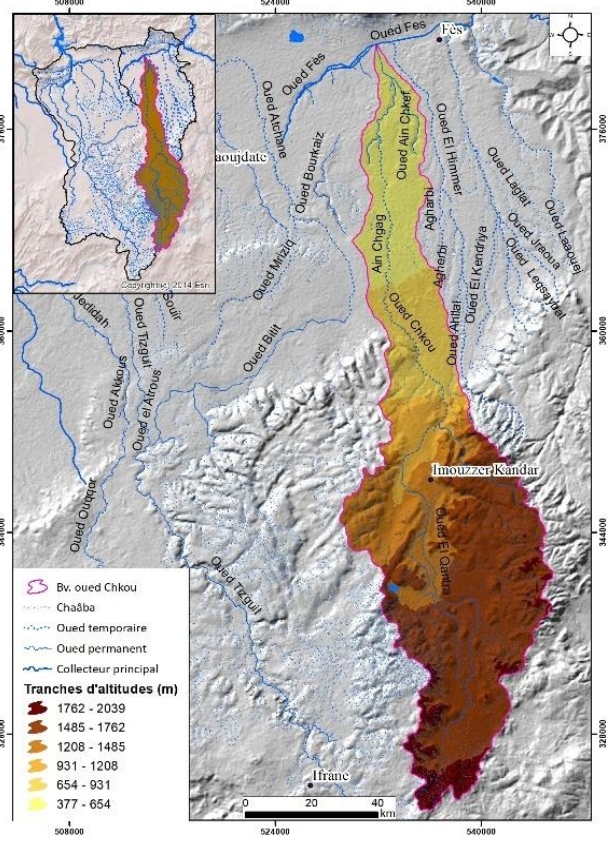


Figure 18: Sous bassin versant de l'oued Chekkou

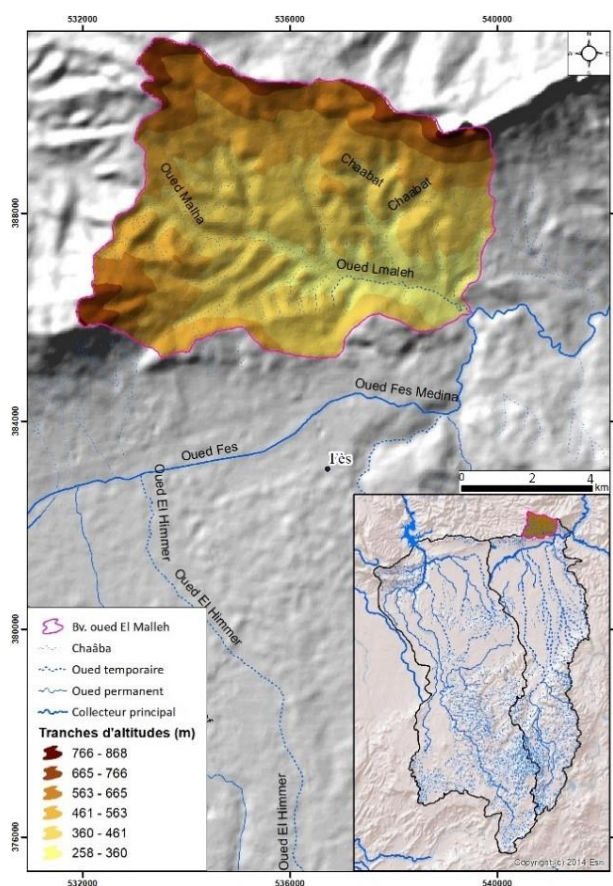


Figure 19: Sous bassin versant de l'oued El Malleh

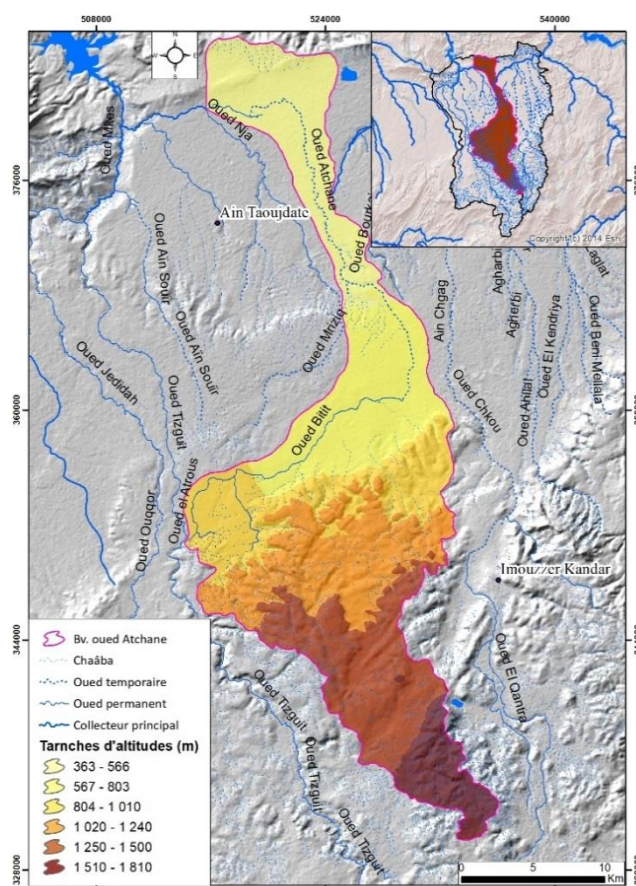


Figure 20: Sous bassin versant de l'oued Atchane

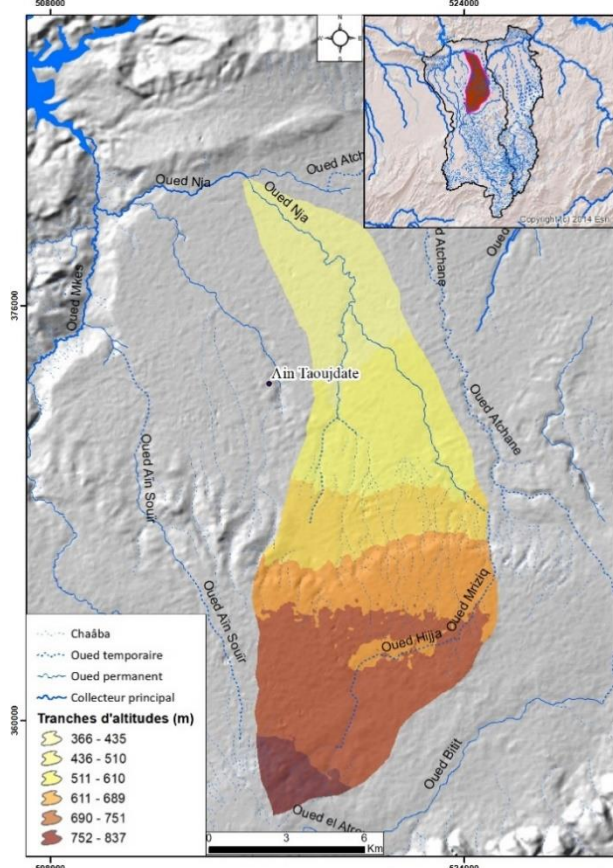


Figure 21: Sous bassin versant de l'oued N'Ja

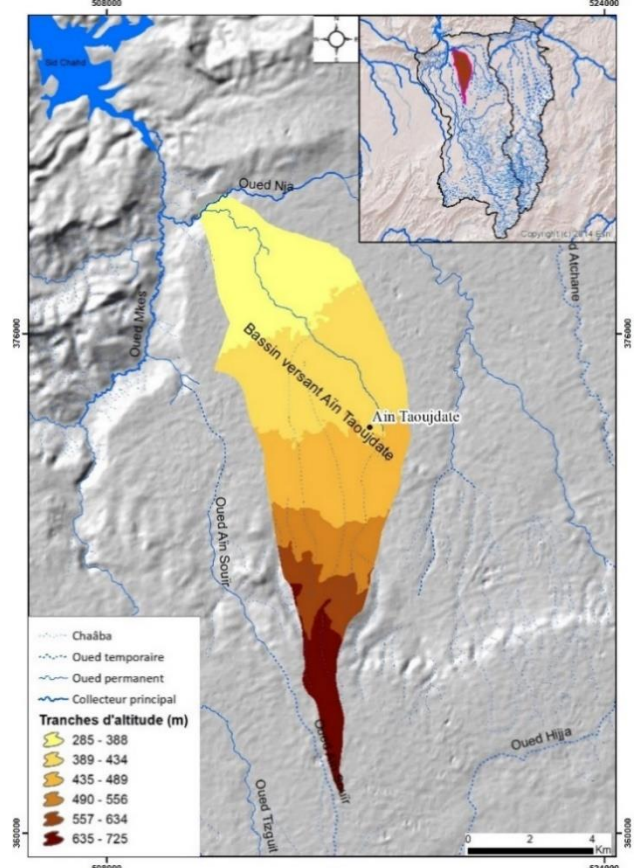


Figure 22: Sous bassin versant d'Ain Taoujdate

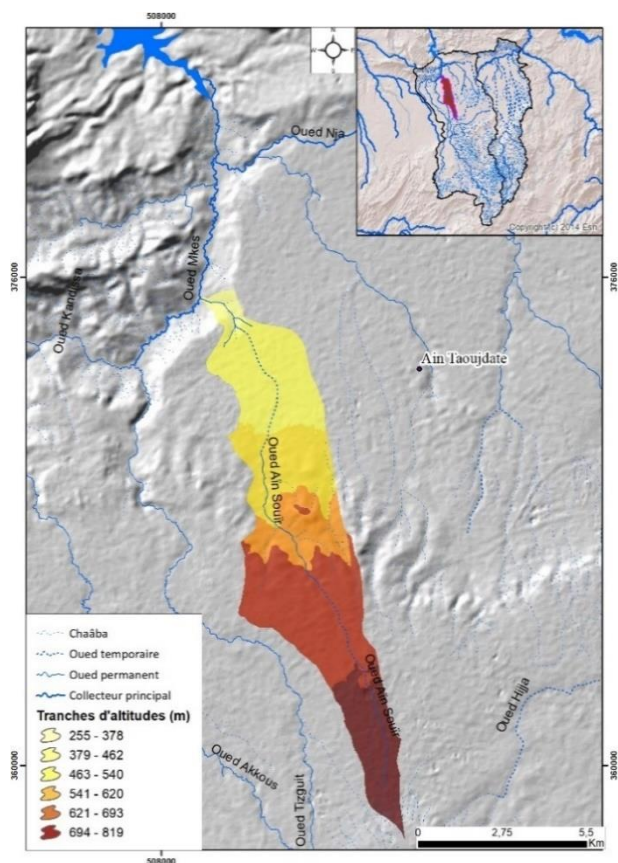


Figure 23: Sous bassin versant Mehdouma

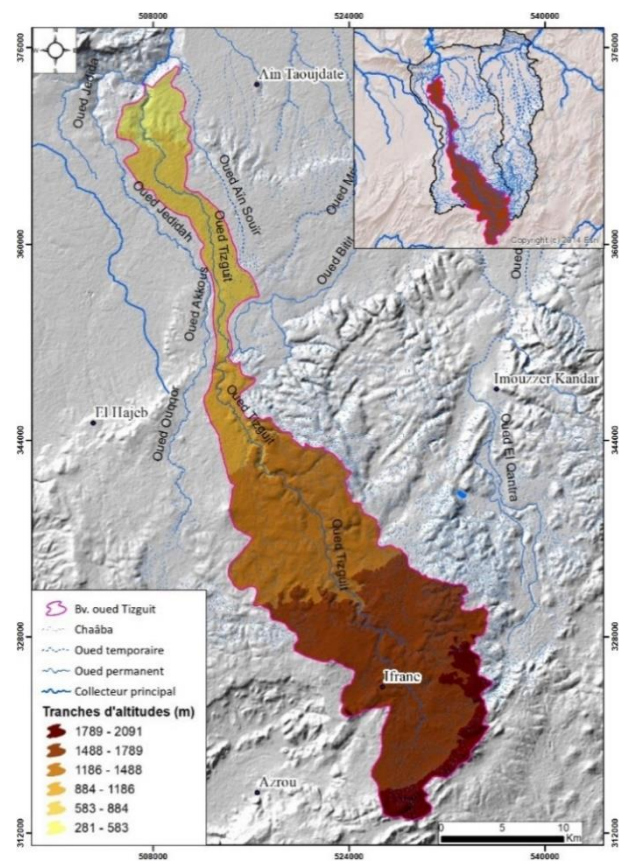


Figure 24: Sous bassin versant de l'oued Tizguit

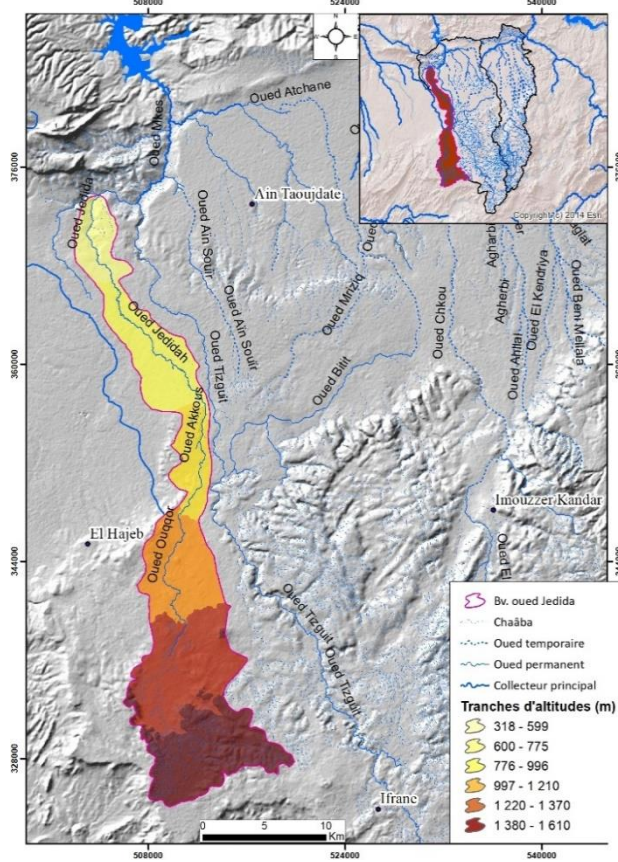


Figure 25: Sous bassin versant de l'oued Jdidda

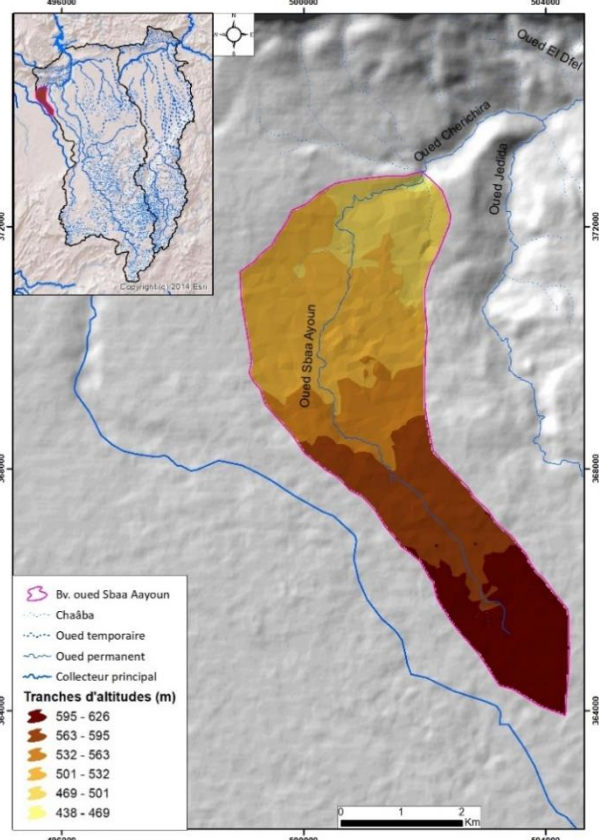


Figure 26: Sous bassin versant Sbaa Ayoun

6. Analyse morphométrique des bassins versants

Plusieurs chercheurs en hydrologie ont essayé d'approcher la forme des bassins versants via des indices, dits « indices morphométriques ». Car, la forme des bassins versants joue un rôle déterminant sa réponse hydrologique. (Roche, 1963 ; Strahler, 1964 ; Obda, 2004). Ces indices morphométriques sont l'indice de compacité de Gravelius (**Kc**) ainsi que la longueur (**L**) et la largeur (**l**) du rectangle équivalent.

6.1 Indice de compacité de Gravelius

Afin de déterminer la forme d'un bassin versant, on fait appel à un indice morphologique nommé indice de compacité (Gravelius, 1914) noté (**Kc**). Cet indice correspond, en fait, au rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Cet indice se détermine à partir du périmètre du bassin versant et sa surface. Il est proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire et lorsqu'il est loin de (1) le bassin versant a une forme plutôt allongée. Le tableau suivant montre la relation entre la forme des bassins versants avec la réponse hydrologique attendue (Tab.4).

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

Tableau. 4 : correspondance entre la valeur de Kc et le type de réponse hydrologique attendue.
Source : Roche, 1963 in Obda, 1991 et 2004.

Si le périmètre du bassin est noté (**P**) et sa surface (**A**), l'indice de compacité de Gravelius (**Kc**) s'exprime comme suite :

$$Kc = \frac{0.28 * P}{\sqrt{A}}$$

Cette équation a été exploitée pour calculer l'indice de compacité des bassins versants des oueds Fès et Mikkès ainsi que leurs sous-bassins versants. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 4 ci-dessous.

En termes de résultats, d'après le tableau 4 ci-dessus, on peut remarquer que tous les bassins versants étudiés ont une forme allongée (**Kc** > 1.5), à l'exception des sous-bassins versants des oueds El Malleh (**Kc** = 1.3) ; N'Ja (**Kc** = 1.38) et Sbaa Ayoun (**Kc** = 1.44). Cela va

influencer la réponse hydrologique des bassins versants, qui auront _théoriquement_ une faible concentration des écoulements.

Bassin versant oued Mikkès et ses SBVs				Bassin versant oued Fès et ses SBVs			
	Superficie (km ²)	Périmètre (Km)	(Kc)		Superficie (km ²)	Périmètre (km)	(Kc)
Oued Mikkès	1514	241	1,73	Oued Fès	879	206	1,95
Oued Atchane	457	166	2,17	Oued Chkou	427	158	2,14
Oued N'Ja	153	61	1,38	Oued El Mehraz	138	76	1,81
Oued Ain Taoujdate	62	45	1.6	Oued Boufekrane	52	63	2,45
Oued Ain Souir	45	45	1,88	Oued El Himmer	81	80	2,49
Oued Tizguit	430	185	2,50	Oued El Malleh	34	27	1,30
Oued Jdidda	250	139	2,46	Tableau 5: les indices de forme pour les sous bassins versants de l'oued Fès et Mikkès			
Oued Sbaa Ayoun	20	23	1,44				

6.2 La Longueur et la Largeur du rectangle équivalent (L) (l) des bassins versants

C'est une transformation purement géométrique du bassin versant en un rectangle de dimensions (l) et (L). La longueur du rectangle équivalent (L) permet de comparer les bassins versants entre eux du point de vue de l'écoulement. Il s'exprime comme suit :

$$L = \frac{c\sqrt{S}}{1.12} \left[1 + \left(\sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{c} \right)^2} \right) \right] \text{ Avec :}$$

S = la superficie (km²)

C = indice de compacité de Gravelius.

Tandis que la largeur du rectangle équivalent (l) est présentée comme suit :

$$l = \left(\frac{S}{L} \right) \text{ Avec :}$$

S = la superficie (km²)

L = longueur du rectangle équivalent.

Les résultats calculés pour les différents bassins versants sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous. D'après ces résultats, on peut remarquer une grande différence entre les longueurs et les largeurs des rectangles équivalents des bassins versants étudiés. De ce fait, les réponses hydrologiques et leurs temps de concentration seront différents d'un bassin à l'autre.

	Nom des BVs	Longueur du cours d'eau principal (km)	(L)	(l)
Bv Oued Fès	Oued Fès	97	93,45	9,41
	Oued Chkou	73	73,16	5,84
	Oued El Himmer	39	37,86	2,14
	Oued El Mehraz	29	33,93	4,07
	Oued Boufekrane	29	29,75	1,75
	Oued El Malleh	9	10,15	3,35
Bv Oued Mikkès	Oued Mikkès	99	106,25	14,25
	Oued Atchane	57	77,07	5,93
	Oued N'Ja	35	24,17	6,33
	Ain Taoujdate	20	19,29	3,21
	Oued Mehdouma	19	1,88	20,28
	Oued Tizguit	68	87,59	4,91
	Oued Jdida	47	65,69	3,81
	Oued Sbaa Ayoun	12	9,36	2,14

Tableau 6: Longueur et largeur du rectangle équivalent des SBVs de l'oued Mikkès et l'oued Fès

7. Topographie et énergie de relief des bassins versants

Comme il a été déjà mentionné, les deux bassins versants des oueds Fès et Mikkès drainent quatre unités topographiques différentes : Le Moyen Atlas (Photo. 10), le dir (Photo. 11), le plateau de Saïs (Photo. 12) et les rides du Prérif (Photo. 13).

La première unité topographique se localise au Sud et présente la zone la plus élevée des deux bassins versants (2091 – 900 m). La deuxième (le dir) est une zone transitoire entre le Moyen Atlas et le plateau de Saïs, cette zone de transition est marquée par des processus morphogéniques très actifs, dont témoigne la présence de canyons et ravins très encaissés (Lasri, 2015). Le plateau de Saïs représente la troisième unité topographique. Il est relativement plat (400 à 700 m), avec une douce inclinaison du sud vers le Nord (0.1%). Pour les rides prérfaines au Nord, ils apparaissent comme une unité montagnarde par ses altitudes élevées par rapport au plateau de Saïs. Les points culminants sont Jbel Tghat (860m) et Jbel Zalagh (900m) pour le bassin versant de l'oued Fès, et Jbel Beni Amer (1089 m) pour le bassin versant de l'oued Mikkès (Fig. 27).

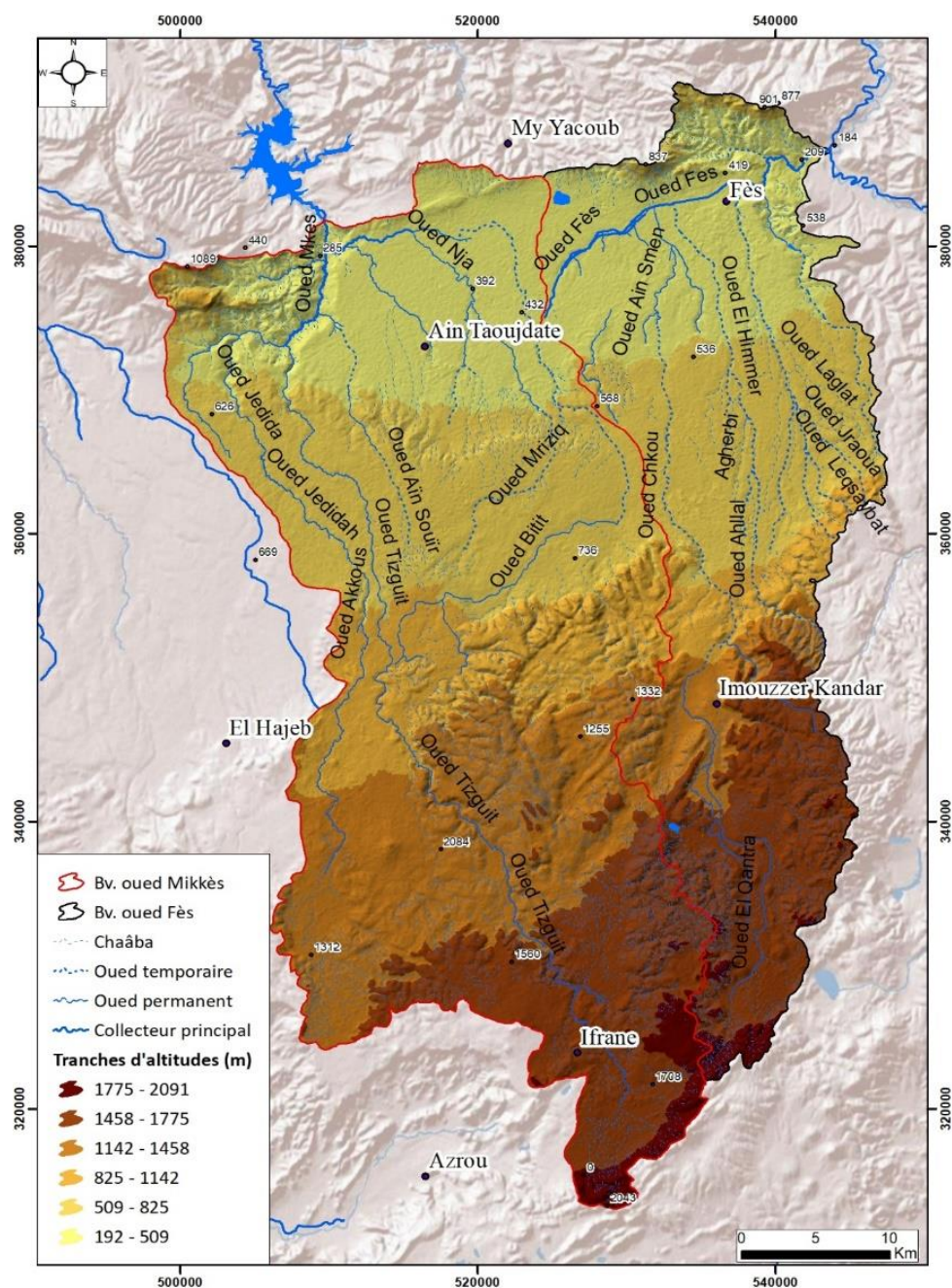


Figure 27: hypsométrie des deux bassins versants de l’oued Fès et l’oued Mikkès



**Photo 10: Causse d'Imouzzer au Moyen Atlas.
(1 Avr. 2015)**



**Photo 11: Le Dir d'Imouzzer Kander.
(11 Juin. 2016)**

**Photo 12: Plateau de Saïss. (1 avr. 2015)****Photo 13: Rides prérfaines. (20 Sep. 2015)**

La topographie influence directement le comportement hydrologique des bassins versants. Les altitudes, les pentes, l'exposition des versants sont tous des facteurs déterminants, à la fois, les caractéristiques climatiques et la réponse des bassins versants face aux sollicitations. Dans ce cadre, une analyse minutieuse vise à déterminer les caractéristiques topographiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès, ainsi que leurs sous-bassins versants. Cette analyse est basée sur l'étude de l'hypsométrie et les pentes, afin de prévoir leurs impacts sur le comportement hydrologique des bassins versants étudiés.

7.1 Hypsométrie des bassins versants

Pour analyser la topographie et les altitudes des bassins versants de l'oued Fès et Mikkès, on a élaboré une carte hypsométrique représentant les altitudes en tranches équitables (Fig. 27). Ces dernières sont utilisées pour produire une courbe hypsométrique pour chacun des deux bassins.

7.2 Les courbes hypsométriques des bassins versants

La courbe hypsométrique présente la relation entre la surface et l'altitude des bassins versants. Elle a été développée par Strahler (1952), qu'il l'a mis en œuvre pour évaluer la dissection et l'évolution du relief. De ce fait, la courbe hypsométrique fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. Cette courbe représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude. Elle porte en abscisse la surface (ou le pourcentage de surface) du bassin qui se trouve au-dessus (ou au-dessous) de l'altitude représentée en ordonnée. Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de superficie, au-delà d'une certaine altitude (Laborde, 2000).

Les courbes hypsométriques des bassins de Fès et Mikkès sont élaborées à partir un modèle numérique de terrain (MNT), traité sur le SIG (ArcGIS®), qui nous a permis de calculer la surface de chaque tranche altitudinale (Tableau 7 et 8).

Les altitudes du bassin versant de l'oued Fès sont comprises entre 2030 m dans le Moyen Atlas et 190 m à m'exutoire (confluence avec oued Sebou). Pour le bassin versant de l'oued Mikkès les altitudes varient entre 2091 m et 220m à l'entrée du Barrage Sid Echahed.

Tranches d'altitudes	Surface en Km ²	Surface en %	Cumulée des surfaces	Superficie cumulée en %
1850-2030	6.94	0.79	6.94	0.79
1700-1850	55.98	6.35	62.92	7.14
1550-1700	107.47	12.22	170.39	19.36
1400-1550	69.68	7.93	240.07	27.29
1250-1400	37.29	4.24	277.36	31.53
1100-1250	36.86	4.19	314.22	35.72
950-1100	25.26	2.87	339.48	38.59
800-950	36.75	4.17	376.23	42.76
650-800	86.79	9.87	463.02	52.63
500-650	172.04	18,57	635.06	71.20
350-500	227,62	26.88	826.68	98.12
190-350	16,57	1.88	879.37	100
Total	879,37	100	879.37	100

Tableau 7: Répartition hypsométrique dans le bassin versant de l'oued Fès

Tranches D'altitudes	Surface en Km ²	Surface en %	Cumulée des surfaces	Superficie cumulée en %
1801-2091	222,96	1,52	222,55	2
1650-1801	121,18	8	401,46	10
1498-1650	93,6	6,18	663,45	16
1348-1498	181,05	11,96	783,7	28
1182-1348	171,57	11,33	923,59	39
981-1182	139,89	9,24	1095,16	48
782-981	120,25	7,94	1276,21	56
607-782	261,99	17,31	1369,81	73
455-607	178,92	11,82	1490,99	85
220-455	222,55	14,7	1513,95	100
Total	1513,95	100	1513,95	100

Tableau 8: Répartition hypsométrique dans le bassin versant de l'oued Mikkès

Pour le bassin versant de l'oued Fès, les altitudes dominantes sont comprises entre 350-800 m et représentent plus de 50 % de la superficie totale du bassin versant (879 km²). En ce qui concerne le bassin versant de l'oued Mikkès, 30 % des terrains drainés sont entre 450 et 780

m. Au niveau de l'amont, la tranche altitudinale 1180 – 1500 m présente 22 % de la superficie totale du bassin versant de l'oued Mikkès (1513 km²).

La comparaison entre les courbes hypsométriques des oueds Fès et Mikkès montre une différence au niveau de la partie médiane. En effet, les dirs de Sefrou et d'Imouzzer sont à l'origine de la chute de la coupe hypsométrique du bassin de Fès. Tandis que la pente de la courbe hypsométrique du bassin versant de l'oued Mikkès est plus ou moins constante.

Pour ce qui est des sous bassins versants de l'oued Fès (Fig. 28), les trois sous-bassins limitrophes de Boufkrane, El Mehraz et El Himmer présentent des courbes hypsométriques similaires, du fait qu'ils drainent plus ou moins les mêmes unités topographiques. Les pentes sont raides en amont et faible dans la tranche altitudinale, représentant le plateau de Saïs. En l'exutoire, la courbe chute encore une fois avant de rejoindre oued Fès. L'oued Chekkou quant à lui, a une courbe complexe. Au niveau du causse d'Ifrane, la courbe est plus ou moins constante, avant de chuter au niveau du dir d'Imouzzer. Au Nord, les surfaces occupées par les tranches altitudinales du bassin versant de l'oued El Malleh sont presque équitables, de ce fait, son système de pentes est assez constant.

Par ailleurs, les courbes hypsométriques des 7 sous-bassins versants de l'oued Mikkès sont toutes différentes (Fig. 28). À l'exception du bassin versant de l'oued Atchane, toutes les courbes hypsométriques sont assez complexes.

Le dir d'El Hajeb occasionne une chute brutale de la courbe. Les bassins qui prennent naissance au niveau des sources de Saïs sont conditionnés par la topographie peu ondulée du plateau. Avant de rejoindre le collecteur principal, les courbes hypsométriques de tous les sous-bassins versants chutent au niveau des vallées encaissées de la partie aval du bassin versant de l'oued Mikkès.

En général, la différence des courbes hypsométriques traduit la différence des reliefs et des systèmes des pentes des bassins versants, ce qui influence le comportement hydrologique de ces derniers. Pour mieux comprendre l'influence du relief sur la réponse hydrologique des oueds étudiés, une analyse plus fine du relief est envisagée, via l'étude des altitudes caractéristiques et l'énergie du relief.

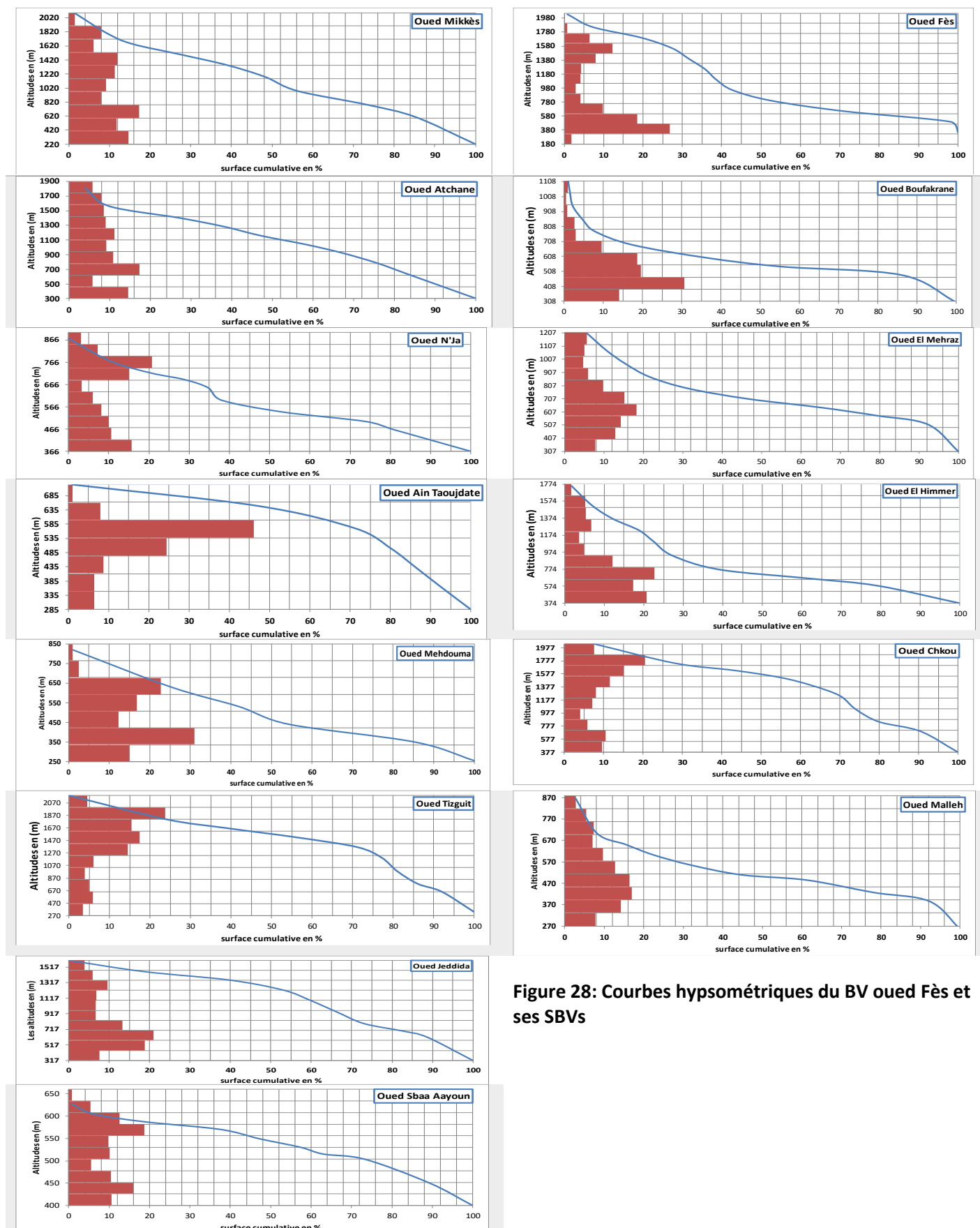


Figure 28: Courbes hypsométriques du BV oued Fès et ses SBVs

Figure 29: Courbes hypsométriques du BV oued Mikkès et ses SBVs

7.3 Les altitudes caractéristiques et l'énergie du relief des bassins

Les altitudes caractéristiques sont tirées à partir des courbes hypsométriques présentées ci-dessus. Elles traduisent l'allure générale de la topographie des bassins versants et leurs systèmes de pentes. Ces altitudes sont :

- Les altitudes maximales et minimales qui présentent le dénivelé du bassin ainsi que sa pente générale. L'altitude maximale est située au point culminant du bassin, tandis que l'altitude minimale est souvent située à son exutoire.
- L'altitude moyenne qui se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique.
- L'altitude médiane correspond à l'altitude liée 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.
- Les altitudes H5% et H95% sont déduites de la courbe hypsométrique et exploitées pour calculer la pente utile et le dénivelé utile, en éliminant les parties extrêmes des bassins versants (amont et exutoire). Les tableaux 9 et 10 ci-dessous récapitulent les altitudes caractéristiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès ainsi que leurs sous-bassins versants.

Altitude caractéristique	Oued Fès	Oued Boufekrane	Oued El Mehratz	Oued El Himmer	Oued Chekkou	Oued El Malleh
Altitude maximale	2030 m	1115 m	1210 m	1760 m	2030 m	900 m
Altitude minimale	190 m	300 m	300 m	380 m	380 m	260 m
Altitude moyenne	1110 m	707 m	755 m	1070 m	1205 m	580 m
Altitude médiane	800 m	550 m	700 m	720 m	1600 m	500 m
H 5%	1710 m	790 m	1070 m	1550 m	2000 m	680 m
H 95%	370 m	360 m	430 m	460 m	510 m	300 m
Dénivelé théorique	1840m	815m	910m	1380m	1650m	640m
Pente théorique	1,96%	2,73%	2,68%	3,63%	2.43%	5,92%
Dénivelé utile	1350m	420m	660m	1010m	1310m	370m
Pente utile	1.44%	1,41%	1,94%	2,66%	1,92%	3,42%
Tableau 9: Altitudes caractéristiques du BV oued Fès et ses SBVs						

Altitude caractéristique	Oued Mikkès	Oued Atchane	Oued N'Ja	Oued Ain Taoujdate	Oued Mehdouma	Oued Tizguit	Oued Jdidda	Oued Sbaa Ayoun
Altitude maximale	2091 m	1808 m	873 m	725 m	819 m	2091 m	1605 m	626 m
Altitude minimale	220 m	363 m	366 m	285 m	255 m	281 m	317 m	438 m
Altitude moyenne	1155 m	1085 m	619 m	505 m	537 m	1186 m	961 m	532 m
Altitude médiane	1150 m	1150 m	550 m	645 m	470 m	1570 m	1260 m	550 m
H 5%	1970 m	1750 m	820 m	710 m	790m	2020 m	764 m	610m
H 95%	370 m	360 m	390 m	330 m	290 m	570 m	520 m	425 m
Dénivelé théorique	1871 m	1445 m	507 m	440 m	564 m	1810 m	1288 m	188 m
Pente théorique	1,8 %	1,9 %	2,1 %	2,3 %	2,8 %	2,1 %	2,0 %	2,0 %
Dénivelé utile	1600 m	1390 m	430 m	380 m	500 m	1450 m	244 m	185 m
Pente utile	1,5 %	1,8 %	1,8 %	2,0 %	2,5 %	1,7 %	1,6 %	2,0 %

Tableau 10: Altitudes caractéristiques du BV oued Mikkès et ses SBVs

D'après les tableaux 9 et 10 ci-dessus, les altitudes caractéristiques des bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès sont très proches. La différence des altitudes maximales et minimales, ainsi que les dénivelés et les pentes théoriques et utiles sont très faibles entre les bassins de Fès et Mikkès. Quoique leurs dénivelés théoriques soient assez importants (1840 1871 m respectivement pour celui de Fès et celui de Mikkès), leurs pentes utiles sont faibles (1.44% à Fès et 1.5 % à Mikkès). Les formes allongées des deux bassins versants ($L = 93$ km à Fès et 106 km à Mikkès) jouent un rôle important dans l'amortissement de leurs pentes utiles.

En ce qui concerne les sous-bassins versants, la différence des altitudes caractéristiques est très prononcée. Pour les affluents de l'oued Fès, les dénivelés théoriques des sous-bassins augmentent de l'Est à l'Ouest (815 m à Boufkrane ; 910 m à El Mehraz ; 1380 m à El Himmer et 1650 m à Chekkou). Malgré que ce dernier ait le dénivelé le plus important, sa pente utile est moins raide (1.92 %) par rapport à celle d'El Himmer (2.66 %) et El Mehraz (1.94 %). L'oued Boufkrane, quant à lui, présente la pente la plus douce (1.41 %), tandis que le sous-bassin versant l'oued El Malleh _par sa situation au niveau des versants sud des rides pré-rifaines_ se caractérise par la pente utile la plus importante (3.42 %).

À l'Ouest, les 7 sous-bassins versants de l'oued Mikkès sont également assez différents sur le plan topographique. Le dénivelé théorique le plus important est calculé pour le sous bassin

versant de l'oued Tizguit (1810 m) suivi par les sous-bassins versants des oueds El Atchane (1445 m) et oued Jdidda (1288 m). Pour le reste des sous bassins, le contraste d'altitude n'est pas si important (564 m pour le sous bassin versant de l'oued El Mehdouma ; 507 m pour oued N'Ja ; 440 m pour Ain Taoujdate et 188 m pour oued Sbaa Ayoun). En ce qui concerne les pentes utiles, le sous bassin versant de l'oued Mehdouma se caractérise par la pente la plus forte (2.5 %). Le reste des sous bassins versants ont une pente plutôt faible (1.8 % pour les oueds N'Ja et Atchane ; 1.7 % pour Tizguit et 1.6 % pour le sous bassin versant de l'oued Jdidda).

En général, les altitudes caractéristiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès et leurs sous-bassins versants, donnent une idée sur la configuration générale de la topographie de bassins étudiés. D'après les résultats obtenus, on peut dire que la zone d'étude à une pente généralement faible. Mais pour mieux confirmer ce constat, on va faire appel à un indice déterminant l'énergie de relief des bassins versants. Il s'agit du Dénivelé Spécifique (**Ds**). Ce dernier est un indice général du relief du bassin versant, défini de la façon suivante :

$$\mathbf{Ds} = \mathbf{PU} \times \sqrt{\mathbf{S}} \text{ Avec } \mathbf{PU} = \frac{\mathbf{DU}}{\mathbf{L}} \times 100 \text{ et } \mathbf{DU} = \mathbf{H5\%} - \mathbf{H95\%}$$

- **DU** : L'altitude qui présente **5%** - L'altitude qui présente **95%**
- **PU** : La pente utile en %
- **Ds** : Dénivelée spécifique
- **L** : la longueur du rectangle équivalent

Ce paramètre est utilisé pour classer le relief de très fort à très faible, ainsi qu'aide d'expliquer la rapidité de la réponse des bassins versants (Obda. 1991, 2004 et Lasri. 2015). Plus le Ds est grand, plus la réponse tendra à être rapide. Le tableau 10 récapitule la classification la plus courante dans la bibliographie (Roche. 1963 et Obda 2004).

Relief très faible	Ds < 10
Relief faible	10 < Ds < 25
Relief assez faible	25 < Ds < 50
Relief modéré	50 < Ds < 100
Relief assez fort	100 < Ds < 250
Relief fort	250 < Ds < 500
Relief très fort	500 < Ds
Tableau 11: Correspondance type de relief et Dénivelé spécifique	

L'équation ci-dessus a été exploitée pour calculer les Dénivelés Spécifiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès, ainsi que leurs sous-bassins versants. Le tableau 12 suivant

présente les résultats obtenus. D'après ces derniers, le bassin versant de l'oued Mikkès est le seul bassin à relief modéré (**Ds** = 58,59). Les autres bassins se caractérisent par un relief assez faible (Bv oued Fès = 42.7 ; Bv Chekkou = 39.7 ; Bv oued El Atchane = 38.5 ; Bv oued Tizguit = 34.3 et Bv oued Jdidda = 25.5) à faible (Boufkrane = 10.1 ; El Mehraz = 22.7 ; El Himmer = 23.8 ; El Malleh = 19.9 ; N'Ja = 21.9 ; Taoujdate = 15.5 ; Mehdouma = 16.5). Le seul bassin caractérisé par un relief très faible est celui de l'oued Sbaa Ayoun (**Ds** = 8.8).

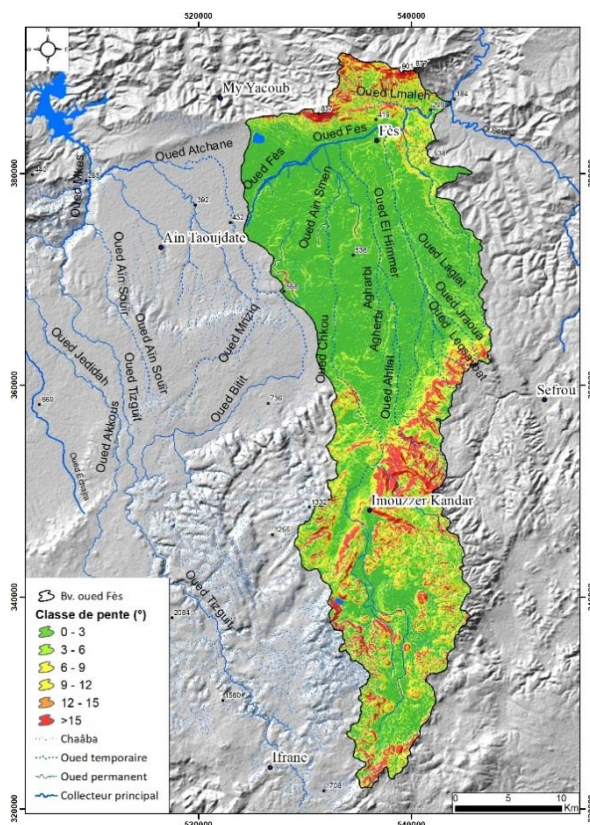
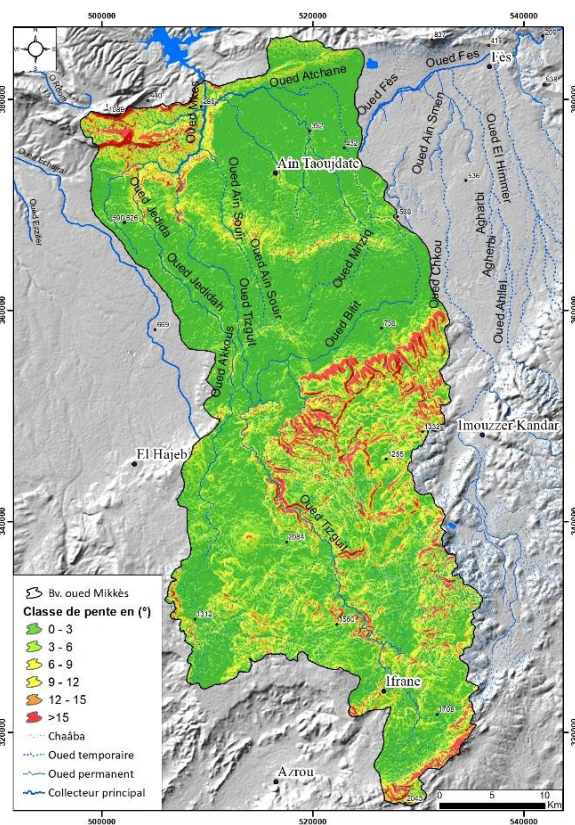
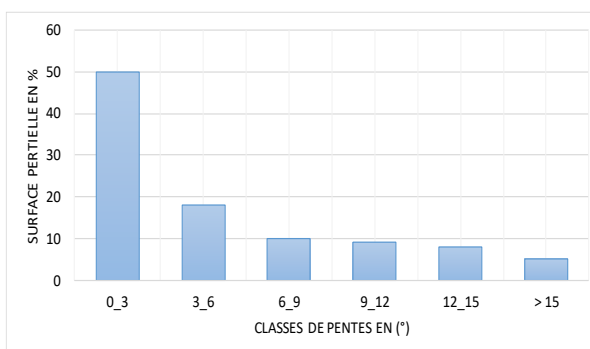
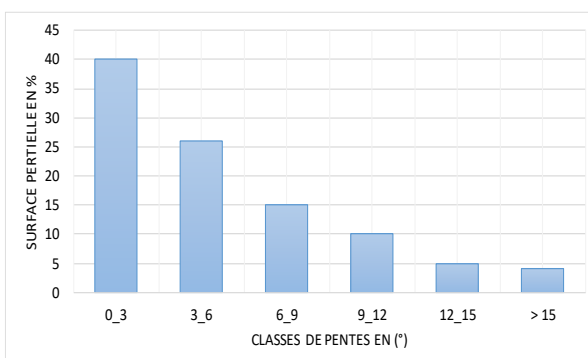
BVs	Oued Fès		Oued Boufekrane	Oued El Mehraz	Oued El Himmer	Oued Chekkou		Oued El Malleh
Dénivelé Spécifique	42,70		10,19	22,75	23,88	39,72		19,93
BVs	Oued Mikkès	Oued Atchane	Oued N'Ja	Oued Ain Taoujdate	Oued Mehdouma	Oued Tizguit	Oued Jdidda	Oued Sbaa Ayoun
Dénivelé Spécifique	58,59	38,54	21,99	15,50	16,52	34,32	25,51	8,83
Tableau 12: Dénivelé Spécifiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès et leurs SBVs								

En général, les dénivelés spécifiques des bassins étudiés donnent un indice sur l'énergie de relief qui a tendance à être faible à assez faible, à l'exception du bassin versant de l'oued Mikkès qui se caractérise par un relief modéré. Cette conclusion, se traduit au niveau du comportement hydrologique des bassins, qui ne peuvent générer qu'une faible réponse hydrologique, à cause de leurs formes allongées et reliefs assez faibles.

7.4 Le système de pentes dans les deux bassins versants

Le système de pentes conditionne plusieurs actions dans le comportement hydrologique des bassins versants. Il permet d'évaluer deux facteurs internes : l'énergie érosive et le temps de réponse des écoulements.

Malgré la faible pente théorique et utile des bassins versants oued Fès et oued Mikkès, le système de pente est très constaté entre les différentes parties des bassins. Pour le bassin versant de l'oued Fès, la figure 30 montre que la moitié de la surface du bassin est dominée par des pentes inférieures à 3°. Ces terrains se localisent principalement au plateau de Saïss. Cependant, les pentes sont assez importantes au niveau des rides pré-rifaines, au dir et au cause du Moyen Atlas. Les pentes dépassant 12° occupent 13 % des terrains du Bv Oued Fès (Fig. 32).

**Figure 30: Carte des pentes du BV oued Fès****Figure 31: Carte des pentes du BV oued Mikkès****Figure 32: Classes de pentes du BV Oued Fès****Figure 33: Classes de pentes du BV Oued Mikkès**

En ce qui concerne le bassin versant de l'oued Mikkès, les faibles pentes sont assez dominantes (Fig. 31). Les terrains aux pentes inférieures à 6° occupent 66 % de la surface totale du bassin. Tandis que les pentes dépassant 12° ne pressentent que 9 % (Fig. 33). Elles se localisent au niveau des versants du Jbel Beni Amer, la flexure d'Ain Taoujdate, le dir d'Ifrane, ainsi que quelques versants raides au Moyen Atlas.

En conclusion, nous pouvons dire que les caractéristiques topographiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès favorisent une réponse hydrologique assez faible. Malgré

les dénivelés importants ; l'indice de relief des bassins ainsi que la pente générale sont amortis à cause de la forme allongée des bassins versants.

8. Les caractéristiques hydromorphométriques des BVs des oueds Fès et Mikkès

Après avoir analysé la morphométrie et la topographie des bassins versants des oueds Fès et Mikkès, ainsi que leurs sous bassins versants, cet axe du chapitre sera focalisé sur l'analyse des caractéristiques hydromorphométriques des bassins versants, en se basant sur les calculs des différents indices hydromorphométriques, à savoir : la densité de drainage, l'ordination et la hiérarchisation du réseau hydrographique, les profils longitudinaux et les pentes moyennes des principaux oueds.

Ces indices fournissent des conclusions sur l'influence du réseau hydrographique sur la réponse hydrologique des bassins versants. Avant d'entamer l'analyse détaillée des leurs caractéristiques hydromorphométriques, on va essayer tout d'abord de présenter les principaux oueds constituant le réseau hydrographique des deux bassins versants étudiés.

8.1 Présentation du réseau hydrographique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers un exutoire bien défini. Les bassins versants des oueds Fès et Mikkès sont drainés par 12 oueds. 5 affluents de l'oued Fès et 7 affluents de l'oued Mikkès (Fig. 34).

L'oued Fès a une direction Ouest-Est et coule sur 27 km de sa source au niveau du domaine de Ras El Ma (430 m) jusqu'à sa confluence avec oued Sebou (190 m). Il draine la partie basse du plateau de Saïss aux pieds des versants nord des Jbel Tghat et Zalagh.

Le tronçon traversant la ville de Fès et sa médina (12 km) est fortement anthropisé (canalisé et endigué) et reçoit 4 affluents (oueds Chekkou, El Himmer, El Mehras et Boufkrane) au niveau de sa rive droite et un seul affluent (oued El Malleh) au niveau de sa rive gauche à la sortie de la médina.

- **Oued Chekkou** : il est le plus long des affluents (73 km) et draine le plus grand des sous-bassins versants de l'oued Fès (427 km²). Il prend naissance au niveau du causse d'Ifrane (1900 m), où il prend le nom d'oued El Qantra qui a un écoulement permanent. En arrivant au dir d'Imouzzar, l'oued Chekkou descend via une série de cascades pour

arriver au plateau de Saïs. Au ce niveau-là, son écoulement devient intermittent, jusqu'à son arrivée au ravin de l'oued Ain Smen qui coule d'une façon permanente. Avant 3 km de sa confluence avec l'oued Fès, il rejoint l'oued Ain Chkef qui augmente son débit (Photo : 14).

- **Oued El Himmer** : coule sur 39 km en descendons du canyon du massif de Kenddar (1400 m), où il a un écoulement torrentiel. En arrivant au Saïs, les écoulements de l'oued El Himmer perdent leur vitesse et deviennent intermittents. Cet oued traverse la partie sud de la ville de Fès et rejoint l'oued Fès au quartier Doukarat (Photo : 15).
- **Oued El Mehraz** : a une longueur de 29 km. Il prend naissance au niveau des ravins encaissés du dir de Sefrou. Son chenal s'individualise un fois arriver au plateau de Saïs. Son écoulement est intermittent, mais peut générer des inondations exceptionnelles en aval (Lasri, 2015). C'est pourquoi, un barrage et un canal de déviation sont édifiés sur son chenal avant d'atteindre le périmètre urbain de Fès. Au niveau de son aval, la vallée de l'oued El Mehraz est encaissée pour rejoindre l'oued Fès à l'entrée de la médina (Photo : 16).
- **Oued Boufkrane** : s'écoule également sur 29 km. Avec un écoulement saisonnier, sa source se situe au pied de Jbel Ksiksou (1115 m) au dir de Sefrou. En s'approchant de son exutoire, sa vallée devient de plus en plus encaissée, où se trouve le barrage El Gaada, à 5 km de l'entrée de la médina, où il rejoint oued Fès (Photo :17).
- **Oued El Malleh** : est le seul affluent de la rive gauche. Il a une direction NW-SE en drainant les versants sud de Jbel Zalagh. Son écoulement est intermittent et torrentiel à cause des pentes fortes et la faible perméabilité de ses terrains. Il rejoint oued Fès à 6 km de sa confluence avec oued Sebou (Photo : 18).
- **Oued Bourkaiz** : draine un canyon de 10 km, creusé dans les calcaires lacustres de Saïs. Son débit permanent, n'atteint que rarement l'oued Fès, car il s'infiltre au niveau de la dépression de Zlilig au périphérique SO de l'agglomération de Fès (Photo :19).

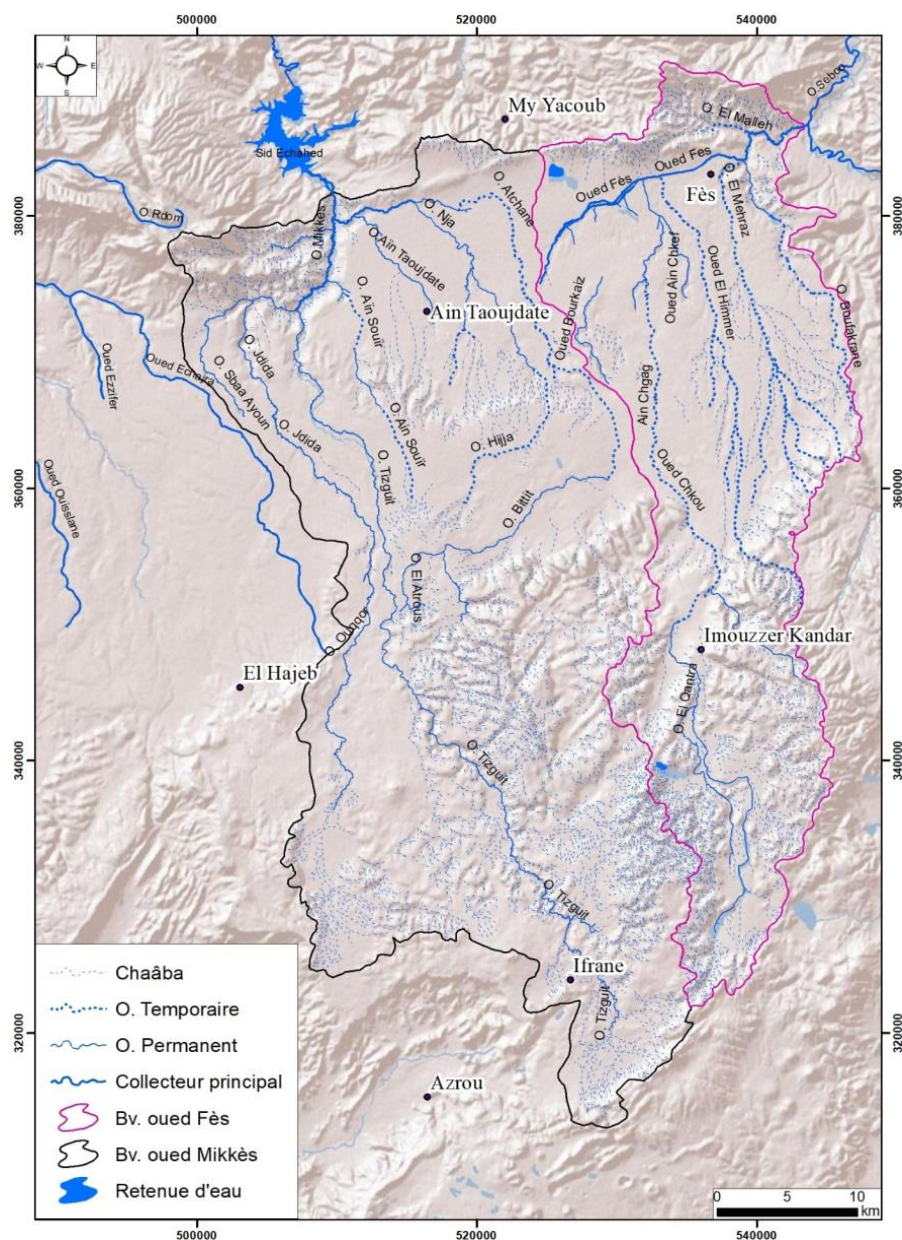


Figure 34: Réseau hydrographique des deux bassins versants oueds Fès et Mikkès



Photo 14: Oued Chekkou au niveau du Moyen Atlas. (15 sept. 2016)



Photo 15: Exutoire oued El Himmer (avant la confluence oued Fès). (18 mai 2015)



Photo 16: Oued El Mehraz. (Quartier Mont fleuri). (24 mai 2015)



Photo 17: Oued Boufekrane (Aval l'entrée de la médina de Fès). (5sep. 2014)



Photo 18: Photo aérienne (2005) de l'oued El Malleh au nord de la Médina



Photo 19: Oued Bourkaiz (29 nov. 2017)

En ce qui concerne l'oued Mikkès ; il a une direction Sud-Nord, drainant les rides prérfaines sur 40 km pour rejoindre l'oued Sebou. Dans cette étude, on a limité l'oued Mikkès jusqu'à l'entrée de la retenue du barrage Sid Echahed. Cet oued est alimenté par 7 affluents. Les oueds Atchane, N'Ja et Ain Taoujdade alimente sa rive droite, alors que les oueds Sbaa Ayoun, Jdidda, Tizguit et Ain Souir alimentent la rive gauche. Ces oueds sont présentés ci-dessous :

- **Oued Atchane** : draine le plus grand sous bassin versant (457km²) sur une longueur de 57 km. Son amont est caractérisé par les terrains karstiques et basaltiques du causse d'Ifrane. De ce fait, son réseau hydrographique n'est que des vallées séchées non acheminées. Son chenal ne s'individualise qu'à partir du dir, où il est alimenté par une série de sources de débordement (Ain Ageumgeum ; Ain Ribaa et Ain Bittit). Malgré les débits importants de ces sources, l'oued Atchane perd ces écoulements au contrebas de la flexure d'Ain Taoujdade. Son écoulement devient alors intermittent jusqu'à aux sources Chrarda et Ezzroureg qui le réalimentent pour rejoindre l'oued N'Ja à 6 km de sa confluence avec oued Mikkès (Photo :20).

- **Oued N'Ja** : s'écoule sur 35 km et draine un bassin de 153 km². Il prend naissance au niveau du plateau Ain Taoujdate, à la source Hijja. Cette dernière ne garantit pas la permanence de son débit. Ce n'est qu'à partir de la grande source « Ghara » que son écoulement devienne permanent. (Photo :21).
- **Oued Ain Taoujdate** : draine le plateau de Saïs sur 20 km à partir de la flexure d'Ain Taoujdate. Son écoulement devient permanent à partir d'Ain Taoujdate jusqu'à son exutoire sur l'oued N'Ja à 2 km de la confluence avec l'oued Mikkès. (Photo : 22).
- **Oued Ain Souir** : est un petit affluent de 19 km qui draine le bassin versant Mehdouma (45 km²). Cet oued prend naissance au niveau des ravins de la flexure d'Ain Taoujdate. À ce niveau-là, son écoulement est intermittent. Il devient permanent seulement 2 km avant la confluence avec oued Mikkès, grâce à quelques sources au niveau du Douar Ain Chkef. (Photo : 23).
- **Oued Tizguit** : présente l'affluent le plus important. Sa longueur atteint 68 km drainant un bassin versant de 430 km². Il prend naissance au niveau du causse d'Ifrane sur une altitude de 1760 m. Contrairement à l'oued Atchane, le chenal de l'oued Tizguit est bien tracé de l'amont jusqu'à sa confluence avec l'oued Mikkès. Son écoulement est permanent, alimenté par plusieurs sources au niveau du causse d'Ifrane et au plateau de Saïs. Cependant, son débit est très variable de l'amont à l'aval à cause des infiltrations au niveau des coulées basaltiques ainsi que les prélèvements des riverains. Il rejoint oued Mikkès à 13 km du barrage Sid Echahed (Photo :24).
- **Oued Jdidda** : s'écoule sur 47 km à partir du dir d'El Hajeb. Son chenal s'individualise qu'à partir du plateau de Saïs, car en amont, le réseau hydrographique est quasiment absent à cause des coulées basaltiques qui infiltrent la totalité de la lame d'eau précipitée. Le débit de l'oued Jdidda est permanent à partir de l'importante source de débordement « Ain Akkous ». Il rejoint la rive gauche de la vallée encaissée de l'oued Mikkès à 14 km de la retenue du Barrage Sid Echahed (Photo :25).
- **Oued Sbaa Ayoun** : est le plus petit affluent, avec seulement 12 km de longueur. Plusieurs sources sont à l'origine de son écoulement. De nos jours, ces sources sont presque sèches, et le débit de l'oued Sbaa Ayoun est alimenté principalement par les eaux usées du centre urbain Sbaa Ayoun. Cet oued rejoint oued Jdidda à 4 km de la confluence avec l'oued Mikkès (Photo : 26).



Photo 20: Photo aérienne (2005) de l'oued Atchane au niveau du plateau de Saïss



Photo 21: Oued N'Ja (15 sept. 2016)



Photo 22: Oued Ain Taoujdate. (20 sept. 2015)



Photo 23: Oued Ain Souir avant la confluence oued Mikkès. (20 sept. 2015)



Photo 24: Oued Tizguit à l'amont (25Sept. 2016)



Photo 25: Oued Jedida à l'entrée du plateau de Saïss. (12 avr. 2015)

**Photo 26: Oued Sbaa Ayoun (20 sept. 2015)****Photo 27: Oued Mikkès Aval. (20 sept. 2015)**

Le régime et le comportement hydrologique de ces oueds seront étudiés davantage dans le troisième chapitre, via l'analyse de résultats des campagnes de jaugeages réalisées sur les oueds étudiés. Dans les axes suivants, l'analyse du réseau hydrographique sera effectuée uniquement à l'échelle des bassins versants des oueds Fès et Mikkès.

8.2 Densité de drainage

L'organisation et la densité du réseau hydrographique dépendent de plusieurs facteurs, à la fois géologiques, lithologiques, pédologiques, morphologiques, climatiques et voir même anthropiques (Musy & Higy 2004). L'hydrologue Horton (1940), définit la densité de drainage comme étant la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. Elle est décrite comme suit :

$$D_d = \frac{\Sigma L_x}{A} \text{ Avec :}$$

- **Dd** = La densité de drainage en (km/km²) ;
- **Lx** = La longueur totale du réseau hydrographique en km ;
- **À** = La surface du bassin versant en km².

Pour calculer la densité de drainage des bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès, nous nous sommes basés sur le réseau hydrographique, digitalisé à partir des 11 cartes topographiques au 1 : 50'000 couvrant la zone d'étude. Ces cartes sont celles de Fès Est, Fès Ouest, Beni Ammar, Sefrou, Ain Taoujdate, Sbaa Ayoun, Ayoun Snan, Ifrane, El Hajeb, Azrou et Almis Guigou. Le Système d'Information Géographique ArcMap®, a permis de calculer la longueur totale des réseaux hydrographiques des oueds de Mikkès estimé à 1558 km et oued

de Fès estimé à 1471 km. En utilisons l'équation de Horton présentée ci-dessus, on obtient 1.02 km/km² comme densité de drainage du bassin versant de l'oued Mikkès et 1.67 km/mk² comme densité de drainage du bassin versant de l'oued Fès. D'après ces chiffres, on peut dire que malgré la longueur totale du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mikkès soit supérieure à celle du bassin versant de l'oued Fès, ce dernier se caractérise par une densité de drainage plus importante que celle du bassin versant de l'oued Mikkès. Mais, pourquoi ? Deux raisons expliquent cela : Tout d'abord la différence de surfaces entre les deux bassins versants, ainsi que la nature des terrains, notamment en amont. En effet, le couvert lithologique n'est pas le même entre l'Est et l'Ouest. Les coulées basaltiques et/ou les terrains carbonatés caractérisant le bassin versant de l'oued Mikkès, influencent profondément son réseau hydrographique, quasiment absent par endroit. C'est pourquoi, la densité du drainage dans le bassin versant de l'oued Mikkès est inférieure à celle de l'oued Fès. Mais, généralement, les deux bassins versants se caractérisent par une densité de drainage assez faible dans l'ensemble, à cause de leur morphologie, topographie et lithologie.

En ce qui concerne l'influence de la densité du drainage sur le comportement hydrologique des bassins, plusieurs recherches concluent qu'elle joue un rôle déterminant. Car, les réseaux hydrographiques à grand densité, favorisent des réponses hydrologiques plus importantes. Ce phénomène s'explique par l'acheminement et le transfert rapide des écoulements, et par conséquent la concentration rapide des crues (Lasri, 2015). De ce fait, à partir des résultats obtenus, on peut estimer que le réseau hydrographique des bassins versants de l'oued Mikkès et l'oued Fès, vont contribuer à l'amortissement de leurs réponses hydrologiques, à cause de leur faible densité de drainage.

8.3 L'organisation et la hiérarchisation du réseau hydrographique

Après avoir calculé la densité de drainage des deux bassins versants étudiés, cet axe sera focalisé sur la caractérisation de l'organisation des réseaux hydrographiques drainant les bassins de Fès et Mikkès. Pour cette ambition, une classification des réseaux hydrographiques vise à obtenir une hiérarchisation des drains, afin d'évaluer leur degré d'acheminement. Selon Bravard et Petit (1997) : « *La classification d'un réseau hydrographique (ou topologie) est une manière de hiérarchiser l'ensemble des branches d'un réseau hydrographique en attribuant à chacune une valeur entière qui caractérise son importance* ». Pour classer et hiérarchiser les

réseaux hydrographiques étudiés, on s'est basé sur la méthode de Strahler qui considère que tout drain qui n'a pas d'affluent se voit attribuer la valeur **X1**. Puis, un drain d'ordre **X2** est issu de la confluence de deux drains d'ordre **X1**, ainsi de suite. L'ordre de Strahler d'un bassin versant est l'ordre du drain principal à l'exutoire (Musy, 1998). L'application de cette méthode sur la zone d'étude a été très fastidieuse, à cause du grand nombre des chenaux drainant les deux bassins versants (1412 drains au BV oued Mikkès et 1256 drains au BV oued Fès).

En termes de résultats, les tableaux 13 et 14 présentent l'organisation et la hiérarchisation des réseaux hydrographiques des bassins versants des oueds Mikkès et Fès. L'ordre de Strahler calculé pour les deux bassins versants limitrophes égale **X6**, donc l'acheminement de leurs réseaux hydrographiques est peu développé. Ils sont constitués principalement des drains d'ordre **X1**, qui présentent 72.3 % du nombre total des drains du bassin Mikkès et 70.9 % des drains du bassin de l'oued Fès. Ce qu'il faut retenir, c'est que le nombre des branches **X2** et **X3** diminue considérablement par rapport aux drains primaires **X1**. Cela s'explique par le mauvais acheminement de l'écoulement, à cause du facteur lithologique et des processus karstiques. En effet, beaucoup de drainage secondaire et tertiaire (**X2** et **X3**) s'infiltre, et ne parvient pas à rejoindre les collecteurs d'ordre **X4** et **X5**, qui sont peu nombreux (14 dans le BV oued Mikkès et 17 pour oued Fès). Finalement, les collecteurs principaux **X6** sont bien évidemment les oueds Fès et Mikkès. Ce dernier ne devient **X6** qu'à partir de sa confluence avec oued N'Ja, à seulement 3 km de la retenue du barrage Sid Echahed, tandis que l'oued Fès devient **X6** à partir de sa confluence avec oued El Mehraz à 12 km de l'oued Sebou.

À partir de ces résultats, on peut dire que le mauvais acheminement des réseaux hydrographiques des deux bassins versants, va contribuer à l'amortissement de la vitesse et la quantité de leur réponse hydrologique. Cependant, cette dernière ne sera pas la même entre les deux bassins, car l'oued Mikkès draine un bassin fortement perméable, à cause de la grande étendue des coulées basaltiques. Un autre facteur explique la différence entre la réponse hydrologique des deux bassins : il s'agit du style d'écoulement. Si on compare la forme du réseau hydrographique entre les deux bassins (Fig.34), on peut voir clairement que les oueds drainant le bassin de Fès ont un style rectiligne, tandis que ceux de Mikkès serpentent tout au long de leurs trajets jusqu'à l'aval. Cela influence bien évidemment la vitesse et la force de la réponse hydrologique des deux bassins versants étudiés.

Classification du réseau hydrographique du BV oued Mikkès					
Ordre des drains	Nombre des drains	Longueurs des drains (Km)	% du nombre des drains	% des longueurs	Longueur moyenne (km)
X1	1021	841	72,31	53,98	0,8
X2	324	367	22,95	23,56	1,1
X3	52	170	3,68	10,91	3,3
X4	12	112	0,85	7,19	9,3
X5	2	66	0,14	4,24	33,0
X6	1	2	0,07	0,13	2,0
Total	1412	1558 km	100 %	100 %	8,3 km
Tableau 13: Hiérarchisation du réseau hydrographique du BV oued Mikkès					

Classification du réseau hydrographique du BV oued Fès					
Ordre des drains	Nombres des drains	Longueurs des drains (Km)	% du nombre des drains	% des longueurs	Longueur moyenne (km)
X1	891	691	70,94	46,97	0,8
X2	276	250	21,97	17,00	0,9
X3	71	311	5,65	21,14	4,4
X4	14	139	1,11	9,45	9,9
X5	3	68	0,24	4,62	22,7
X6	1	12	0,08	0,82	12,0
Total	1256	1471 km	100 %	100 %	8,4 km
Tableau 14: Hiérarchisation du réseau hydrographique du BV oued Mikkès					

8.4 Profils longitudinaux des oueds Fès et Mikkès

Selon Taous, (2005), « *le profil en long (ou profil longitudinal) est une représentation graphique montrant la variation altimétrique du lit d'un cours d'eau (en ordonnées) en fonction de la distance à l'émissaire (en abscisse)* ». Cette représentation graphique fournit des indices pouvant prévoir la vitesse des écoulements et la géomorphodynamique des cours d'eau. En effet, Bravard et Petit (1997) considèrent que « *le profil en long d'un cours d'eau est souvent approché pour déterminer l'équilibre entre la capacité de transfert d'une part et le calibre de la charge solide en transit d'autre part* ». Les profils longitudinaux des oueds Mikkès

et Fès, ont été élaborés à partir des levés topographiques suivant le tracé du chenal principal des deux oueds, à partir des drains le plus reculés en amont jusqu'à l'exutoire (Fig. 35 et 36).

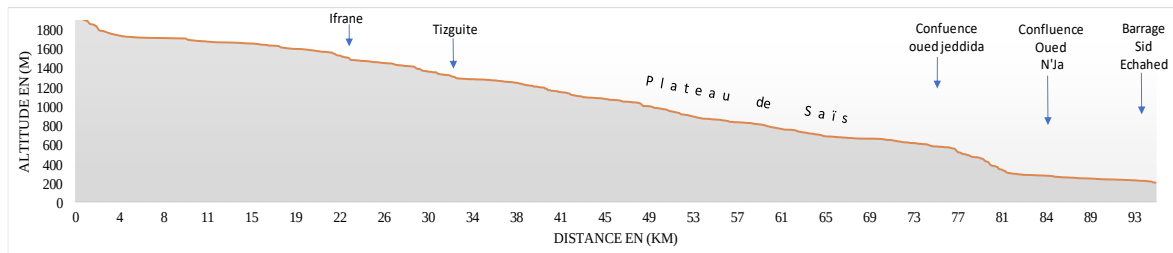


Figure 35: Profil en long oued Mikkès

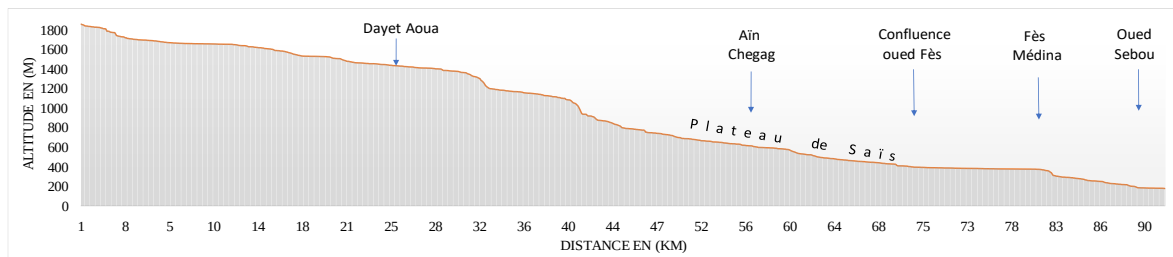


Figure 36: Profil en long de l'Oued Fès

À partir des deux profils longitudinaux présentés ci-dessus, on peut remarquer que le système de pentes des deux oueds a la même allure de la topographie des terrains qui drainent (voir courbes hypsométriques des bassins Mikkès et Fès. (Fig 28 et 29). En effet, à l'instar de la topographie de son bassin versant, le profil longitudinal de l'oued Mikkès présente une pente continue et sans rupture, sauf à l'aval, au niveau de la zone de confluence de tous les affluents, dont les vallées sont encaissées. L'oued Fès, quant à lui, a un système de pente discontinue. Sa courbe présente plusieurs ruptures au niveau du Moyen Atlas, au dir d'Imouzzer et même au plateau de Saïss. Ces conclusions peuvent interpréter la réponse hydrologique des bassins versants via la pente longitudinale moyenne des principaux oueds. Cette pente moyenne fournit un indice pertinent afin d'évaluer le temps de concentration des écoulements et leurs vitesses. Pour le cas des pentes fortes, les écoulements seront rapides et atteignent l'exutoire dans un bref laps de temps, tandis que les faibles pentes favorisent l'infiltration ou la stagnation des écoulements.

Pour calculer la pente moyenne des oueds Fès et Mikkès et leurs affluents, on a divisé le dénivelé des oueds sur leurs longueurs totales, en se basant sur la formule suivante :

$$P_{moy} = \frac{DH_{max}}{L} \text{ Avec :}$$

P moy = pente moyenne de l'oued **m/km** ;

DH max = dénivellation maximale de l'oued en mètre ;

L = longueur de l'oued en **km** ;

Les résultats obtenus sont récapitulés dans les tableaux 15 et 16 ci-dessous. D'après ces résultats, on peut dire que les pentes moyennes des oueds Fès et Mikkès sont très proches (15.7 m/km pour l'oued Mikkès et 16.6 m/km pour l'oued Fès). Les pentes des affluents diffèrent légèrement d'un bassin à l'autre selon la topographie qu'ils drainent. Les oueds Souir, Jdidda et Tizguet ont une pente moyenne modérée, tandis que les autres affluents de l'oued Mikkès _issus des sources de Saïss_ se caractérisent par une pente moyenne faible à très faibles. La même chose pour les affluents de l'oued Fès qui ont des pentes moyennes assez proches, à l'exception de l'oued El Malleh qui se caractérise par une pente forte (54.1 m/km).

Oueds	Mikkès	Atchane	N'Ja	Tizguet	Jdidda	Souir	Sbaa Ayoun	Ain Taoujdate
Longueur (km)	99	57	35	68	47	19	12	20
H max (m)	1770	910	703	1770	1268	739	605	403
H min (m)	220	363	366	281	318	255	438	285
Dénivelé (m)	1550	547	337	1489	950	484	167	118
Pente moyenne (m/km)	15,7	9,6	9,6	21,9	20,2	25,5	13,9	5,9

Tableau 15: Pentes moyennes de l'oued Mikkès et ses affluents (m/km)

Oueds	Fès	Chekkou	El Mehraz	El Himmer	Boufekrane	El Malleh
Longueur (km)	97	73	29	39	29	9
H max (m)	1800	1800	1128	1503	1074	739
H min (m)	192	377	307	372	308	252
Dénivelé (m)	1608	1423	821	1131	766	487
Pente moyenne (m/km)	16,6	19,5	28,3	29,0	26,4	54,1

Tableau 16: Pentes moyennes de l'oued Fès et ses affluents (m/km)

En conclusion, l'analyse des caractéristiques hydromorphométriques donne une idée sur le comportement hydrologique des bassins versants étudiés. Ces derniers se caractérisent par une faible densité de drainage, un réseau hydrographique peu acheminé et des pentes moyennes généralement assez faibles. C'est pourquoi, on peut estimer que les bassins versants des oueds Fès et Mikkès ainsi que leurs sous-bassins versants ne peuvent générer

que des réponses hydrologiques de faible concentration d'écoulements. Pour estimer la vitesse de ces derniers, on va faire appel aux formules empiriques visant l'estimation des temps de concentration des écoulements.

8.5 Temps de concentration des écoulements

En absence de données hydrométriques, on va essayer de comparer les conclusions qu'on a tiré à partir de l'analyse des caractéristiques morphométriques et hydromorphométriques, avec les résultats des méthodes empiriques visant l'estimation des réponses hydrologiques des bassins versants. Pour cette ambition, on va faire appel à quelques équations visant l'estimation des temps de concentration des écoulements des oueds Fès et Mikkès ainsi que leurs affluents. Cet indice de temps de concentration présente le temps écoulé entre le début d'une précipitation et l'atteinte du débit maximal à l'exutoire du bassin versant. Il correspond au temps nécessaire pour permettre à l'eau de ruisseler du point le plus reulé du bassin versant jusqu'à son exutoire (Lasri, 2015). Pour cet effet, deux méthodes simplifiées vont être utilisées pour estimer le temps de concentration des oueds en question. Il s'agit de l'équation de Kirpich et l'équation espagnole. Le choix de ces deux équations est justifié par leur adaptation aux terrains similaires aux conditions de nos bassins versants. Ces deux formules sont présentées ci-dessous :

➤ **Kirpich : $TC = 32,5 \times 10^{-5} \times L^{0.77} \times I^{-0.385}$ avec :**

- **Tc** : temps de concentration en heures
- **L** : longueur du plus long thalweg en m
- **I** : pente moyenne en **m/m**

➤ **Espagnole : $Tc = 0,3 \times (K)^{0.77} \times 60$**

- **Tc** : temps de concentration en minutes
- **K = $L/p^{1/4}$**
- **L** : longueur du bassin
- **P** : pente en m/m

Les tableaux 17 ci-dessous présente les temps de concentration calculés à partir des équations de Kirpich et Espagnole. Le temps de concentration moyen estimé pour l'oued Mikkès est de 10h 11min, tandis que celui de Fès est estimé à 9h 36min. Cette légère

différence est logiquement justifiée par les 4 km de différence entre les longueurs des plus longs chenaux des oueds Mikkès (97 km) et Fès (93 km), ainsi que la légère différence des pentes moyennes des deux principaux collecteurs (Fès = 0.016m/m ; Mikkès = 0.015). Les résultats concernant les affluents sont également assez proches. Les plus longs affluents (oueds Atchane, Tizguit et Chekkou) ont un temps de concentration avoisinant 7h, tandis que celui des petits affluents ne dépasse pas 5h. Ces résultats confirment les conclusions tirées à partir de l'analyse des caractéristiques morphométriques et hydromorphométriques. En effet, les temps de concentration des écoulements des oueds étudiés ne sont pas rapides par rapport à leurs petites tailles.

		Kirpich	Espagnole	Moyenne
Bassin versant oued Mikkès	Oued Mikkès	11h15	9h07	10h11
	Oued Atchane	8h58	6h48	7h53
	Oued N'Ja	6h06	4h44	5h22
	Oued Ain Taoujdate	4h48	3h16	4h02
	Oued Mehdouma	2h52	2h27	2h39
	Oued Tizguit	7h30	6h33	7h02
	Oued Jdidda	5h45	4h53	5h08
	Oued Sbaa Ayoun	2h22	1h58	2h09
Bassin versant oued Fès	Oued Fès	10h54	8h53	9h36
	Oued Chkou	8h08	6h54	7h56
	Oued El Himmer	4h09	3h53	4h09
	Oued El Mehraz	3h38	3h11	3h24
	Oued Boufekrane	3h47	3h15	3h32
	Oued El Malleh	1h10	1h06	1h08

Tableau 17: Temps de concentration calculés pour les oueds Mikkès et Fès et leurs affluents

Pour conclure cet axe, on peut dire que la morphométrie, la topographie et l'hydromorphométrie présentent un facteur amortissant la réponse hydrologique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès. Et pour revenir à notre problématique générale, il faut se poser une question capitale. Est-ce que cette situation va-elle influencer l'hydrosystème de la zone d'étude ? Et comment ? Et dans une optique pragmatique : est-ce que le fait que, la réponse hydrologique des bassins versants des Fès et Mikkès soit faible, présente un élément bénéfique ou néfaste pour l'hydrosystème des deux bassins étudiés ? Pour répondre à ces questions, il faut se positionner devant les principes généraux du cycle de l'eau, qui confirment qu'une grande partie des écoulements lentement et/ou mal drainés, seront voués soit à l'évaporation, soit à l'infiltration.

9. Occupation du sol et perméabilité des terrains

Après avoir analysé le facteur lithologique et son impact sur la perméabilité des terrains des bassins versants de l'oued Fès et Mikkès, l'accent se met dans cet axe sur l'occupation du sol en tant qu'un facteur influençant le comportement hydrologique des bassins versants. En effet, la nature de l'occupation du sol influence directement la capacité de ruissellement ou d'infiltrations des terrains. Afin de spatialiser les éléments d'occupation du sol, on s'est basé sur des images satellitales récentes de la zone d'étude (2018). À partir de ces dernières, on a pu digitaliser les différents éléments, via le Système d'Information Géographique ArcGIS® (Fig. 37).

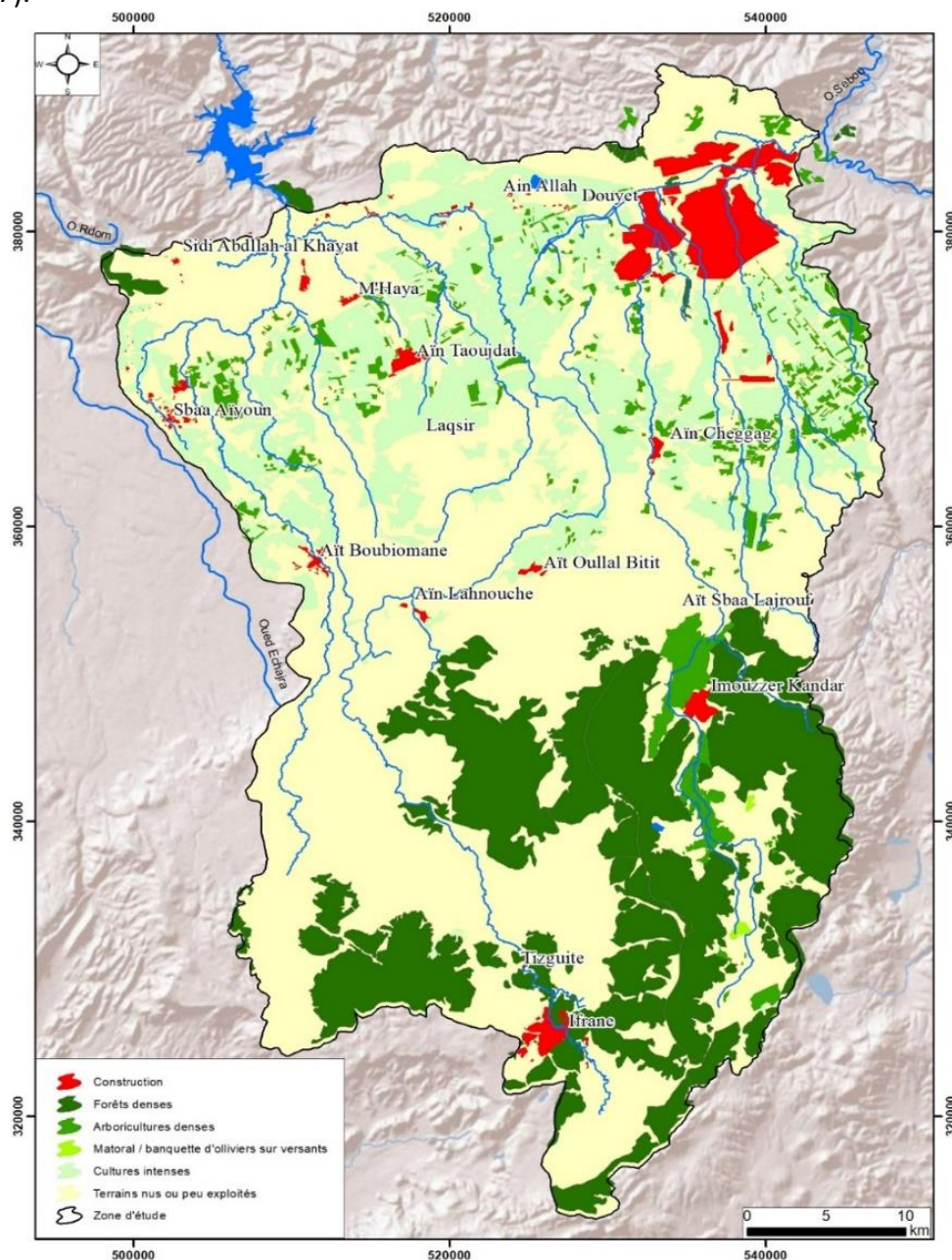


Figure 37: Occupation du sol de la zone d'étude

Selon leur influence sur la perméabilité des terrains, nous avons classé ces éléments en 7 catégories, à savoir : les zones imperméabilisés (constructions), les forêts denses, les matorrals clairsemés, les domaines d'arboriculture dense, les terrains intensément cultivés et enfin les terrains nus ou peu exploités (Fig. 37). D'après la carte ci-dessus, on peut voir que l'amont du bassin versant de l'oued Fès est occupé par une forêt dense (Photo. 29). Cette forêt occupe seulement la partie orientale du bassin versant de l'oued Mikkès, tandis que l'Ouest est caractérisé par des terrains nus, correspondant aux domaines des coulées basaltiques. Ces forêts couvrent 474 km², soit 20.6 % de la surface totale des deux bassins versants.

Les terrains nus ou peu exploités occupent plus que la moitié de la surface de la zone d'étude (1189 km² soit 51.6 %). Ces terrains présentent les zones rocheuses des coulées basaltiques, les versants très escarpés, ou les sols peu fertiles. Ces domaines sont complètement nus, ou cultivés avec des cultures saisonnières peu dense (céréaliculture bourre).

L'arboriculture présente une activité en plein essor, notamment les rosacées. De nos jours, elle occupe 102 km² soit 4.4% de la surface des deux bassins. Elle est concentrée au niveau du causse et du dir d'Imouzzar, ainsi que quelques grandes fermes dans le Saïs.

Grâce à l'abondance des eaux d'irrigation, la zone d'étude est occupée par de larges exploitations d'agriculture intense (428 km² soit 18 % de la surface de la zone d'étude). Cette agriculture moderne est concentrée principalement au niveau du Saïs, tout au long des cours et des points d'eau (sources, puits et forages) (Photos : 30 et 31).

Le cinquième type d'occupation de sol occupe 6 km², soit 0.3% de la surface totale des deux bassins versants. Les matorrals et banquettes d'oliviers sont peu denses et occupent surtout quelques versants marneux des rides pré-rifaines.

D'après cette spatialisation de l'occupation du sol, on peut tirer plusieurs conclusions. Tout d'abord, le rôle de la forêt massive du Moyen Atlas sera axial au niveau du comportement hydrologique des deux bassins versants. En effet, la grande surface des forêts (composées principalement de chêne vert, cèdre et pin maritime) va influencer profondément le bilan hydrique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès, et surtout les sous-bassins versants issus de l'amont. Car, cette forêt va augmenter l'infiltration (conductivité du sol) et l'évapotranspiration et donc réduire le ruissellement.

Selon Taous (2005), *“la présence de plantes contribue à augmenter la capacité de rétention des sols qui sont souvent bien développés dans ces cas”*. La concentration des écoulements s’y trouve donc plus ou moins amortie, selon la nature et l’importance de la couverture végétale. Par ailleurs, l’ETP est généralement plus élevé en forêt que tout autre type de végétation (Aussenac, 1970). Ce facteur sera analysé dans le prochain chapitre.



Photo 28: Le tissu urbain à la partie aval de l’oued Fès



Photo 29: Couverte végétale (Causse d’Ifrane). (20 sept. 2015)



Photo 30: Arboriculture dense (Zone de Douyet, 2 fév. 2018)



Photo 31: Culture irriguée au périmètre de la ville de Fès (6 avr. 2015)

Quoique le rôle de la forêt naturelle soit très important, il ne faut quand même pas négliger le rôle de l’arboriculture. En effet, cette dernière a profondément bouleversé le comportement hydrologique des deux bassins versants. L’expansion de cette activité agricole se développe d’une année à l’autre, colonisant des terrains nus à l’origine, grâce aux subventions offerts pour l’épierrement des domaines rocheux de Saïs. Ces nouvelles pratiques augmentent l’infiltration des terrains mais également le taux d’ETR naturel.

En ce qui concerne l’agriculture irriguée, elle occupe une grande surface du Saïs, augmentant ainsi sa capacité de rétention des eaux précipitées. Mais en même temps, ces pratiques sont

très consommatrice en ressources en eau, à la fois souterrains (pompage) et celle de la surface (canaux d'irrigation (Seguias) provenant des sources) (Photo :32).

En fin, il faut signaler que les deux bassins versants étudiés sont fortement anthropisés, ce qui imperméabilise une grande partie des terrains, influençant ainsi l'infiltration des terrains.

En général, les terrains des bassins versants des oueds Fès et Mikkès, sont très perméables. La combinaison de



Photo 32: Seguia de Bittit. (12 avril 2015)

la lithologie avec l'occupation du sol donne des zones de perméabilité par excellence, notamment le domaine du Moyen Atlas. La seule région peu perméable est celle des versants du Prérif, qui se caractérisent par des terrains marneux nus et très peu perméables. En ce qui concerne le Saïs, l'agriculture intense de ce périmètre irrigué augmente sa rétention d'eau, diminuant ainsi le ruissellement des lames d'eau précipitées.

Globalement, les caractéristiques morphométriques et topographiques des deux bassins versant de l'oued Fès et Mikkès, favorisant un comportement hydrologique assez faible d'un bassin à l'autre. La plaine de Saïs se caractérise par une topographie très faible, dégradée de l'Ouest vers l'Est et du Sud vers le nord, bien que la morphométrie joue un rôle primordial du fonctionnement et le comportement hydrologique des bassins sans oublier les autres facteurs comme la géologie, le climat et l'intervention humaine directe comme indirecte. Autrement dit, les deux bassins versant de l'oued Fès et Mikkès ont un terrain complexe dont l'ensemble des caractéristiques géométriques, géologiques, physiographiques, à l'intervention anthropique, joueront un rôle non seulement dans la réponse hydrologique du bassin à une sollicitation des précipitations (régime des écoulements) mais aussi, en amont et pour certaines d'entre elles (altitude, exposition...), directement dans le processus de formation et la production de la pluie.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Le comportement hydrologique des bassins versants est directement conditionné par leurs caractéristiques physiographiques. La morphométrie, la géologie, la topographie et l'hydrographie sont tous des facteurs déterminant les caractéristiques de la réponse des écoulements suite à une sollicitation. Ces facteurs sont le résultat de longs processus de développement et mutation de la surface terrestre.

L'histoire paléogéographique des deux bassins versants des oueds Fès et Mikkès présentent un bon exemple de cette mutation. Depuis le Tortonien, leur hydrosystème est passé d'un environnement marin, puis lacustre pour devenir complètement continental de nos jours. L'analyse des facteurs actuels des deux bassins versants a fait l'objet de ce premier chapitre. En termes de résultats obtenus, on rappelle que la forme allongée, la topographie peu accidentée, l'hydrographie mal acheminée et les terrains généralement perméables des deux bassins versants ne peuvent que générer de faibles réponses hydrologiques. Cette situation va jouer un rôle décisif concernant l'hydrosystème de la zone d'étude. En effet, les relations entre les écoulements de surfaces et souterrains seront fortement liées et peuvent déterminer les caractéristiques de l'hydrosystème des deux bassins versants étudiés. L'analyse de cette relation fera l'objet du quatrième chapitre de cette thèse. Mais avant d'aborder ce volet, il faut tout d'abord étudier le deuxième facteur influençant d'hydrosystème de tous les bassins versants. Il s'agit du climat, qui sera étudié dans le prochain chapitre.

CHAPITRE II :

CONTRASTES SPATIO-TEMPORELLES DES FACTEURS CLIMATIQUES ET LEURS INFLUENCES SUR LE BILAN HYDRIQUE

Sommaire

1. CONTEXTE DU RESEAU DES STATIONS ET POSTES D'OBSERVATIONS CLIMATIQUES
2. CRITIQUE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES : HOMOGENEISATION ET COMBLEMENTS DES LACUNES
3. VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS
4. ANALYSE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS
5. ANALYSE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES
6. RELATIONS ENTRE LES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES ET LA TOPOGRAPHIE
7. LE CONTRASTE SPATIOTEMPOREL DES TEMPERATURES
8. LES INDICES D'ARIDITE DANS LES DEUX BASSINS ETUDIES
9. EVAPOTRANSPIRATION

INTRODUCTION DU CHAPITRE

Après avoir présenté l'histoire paléogéographique de la zone d'étude et analysé les caractéristiques physiographiques des deux bassins étudiés, le présent chapitre se focalise sur l'analyse d'un facteur déterminant les caractéristiques des hydrosystèmes au niveau planétaire ; il s'agit du climat. En effet, il est impossible de comprendre le comportement hydrologique d'un bassin versant et de quantifier son bilan hydrologique, sans étudier ses caractéristiques climatiques, à savoir : les précipitations, la température et l'évaporation.

En ce sens, ce chapitre se base sur l'exploitation de plusieurs séries de données recueillies ; notamment les précipitations et les températures observées pendant des périodes plus ou moins longues, continues ou discontinues. Une analyse approfondie de ces données est envisagée afin de tirer quelques conclusions pour quantifier et spatialiser l'impact du climat sur le régime hydrologique des bassins étudiés. Pour atteindre cet objectif, la méthode adoptée exige un réseau d'observation assez représentatif et des séries homogènes et relativement longues. Le recueil des données brutes a présenté un réel défi. Malheureusement, l'accessibilité aux données n'est pas si facile auprès des services compétents. Les démarches administratives sont très longues et parfois coûteuses.

Avant d'analyser ces données recueillies, la critique de ces dernières présente une étape primordiale. À cet effet, une vérification de l'homogénéité des données va permettre de détecter toutes les erreurs grossières dont la correction peut parfois être faite avec un peu de bon sens, mais qui pourraient passer inaperçues si l'on se contentait d'examiner des totaux annuels ou même mensuels (Dubreuil, 1974).

Avant d'aborder les objectifs mentionnés ci-dessus, une petite présentation du contexte climatique général de la zone d'étude introduit ce chapitre.

À l'instar de tous les pays méditerranéens, le Maroc par sa localisation au Nord-Ouest d'Afrique est caractérisé par un climat très variable. En effet, le climat marocain comporte beaucoup de nuances. Les climats humide et subhumide caractérisent les terrains élevés du Haut et Moyen Atlas ainsi que la chaîne Rifain. Le Sud et le Sud-Est présentent des domaines Hyperarides. Alors les climats arides et semi-arides règnent dans les autres régions du Royaume. (Fig. 38)

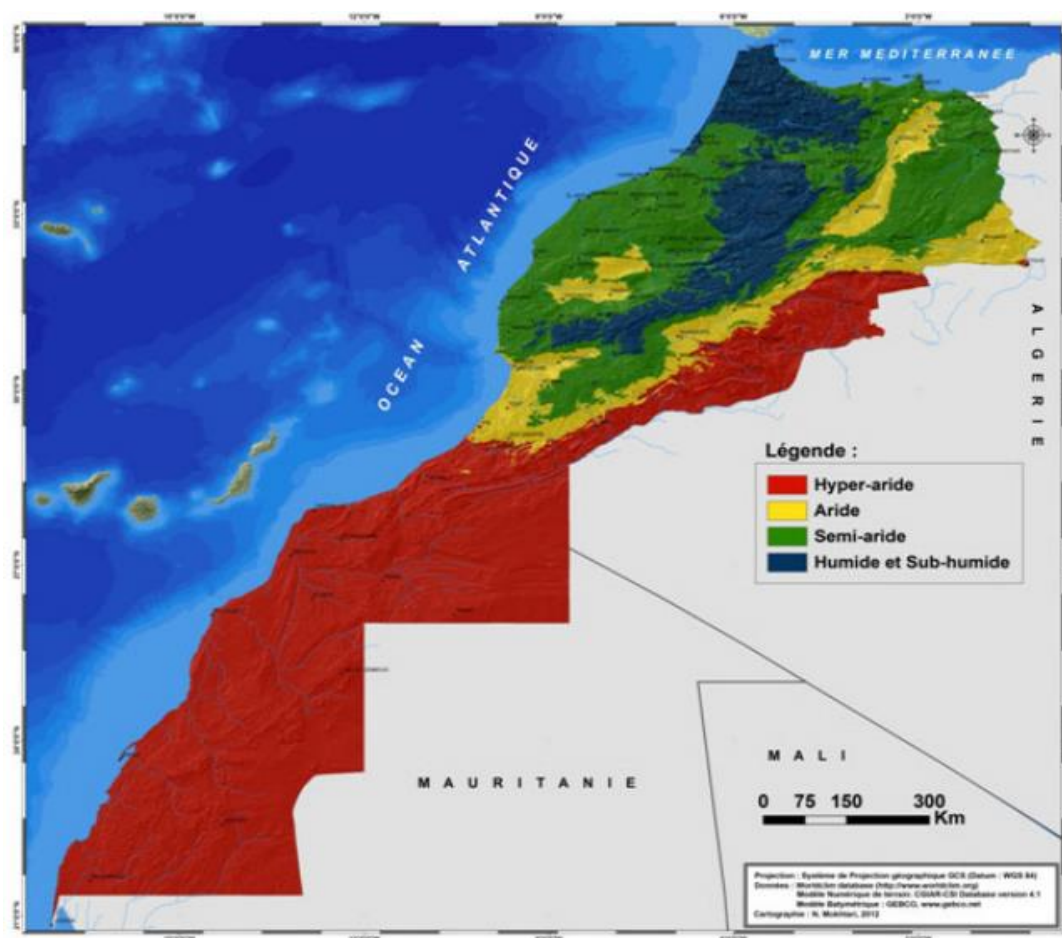


Figure 38: Type de climat selon l'indice d'aridité de De Martonne (Mokhtari. 2013).

Les bassins versants des oueds Fès et Mikkès occupent une zone transitoire entre le Rif et le Moyen Atlas. Ils s'inscrivent dans un contexte climatique méditerranéen influencé par la continentalité et caractérisé par une grande variation selon l'orographie et les saisons. En effet, les deux bassins versants étudiés se caractérisent par une quantité des précipitations très variables d'une zone à l'autre. Les précipitations journalières et mensuelles sont maximales en novembre et décembre et minimales en août et juillet. Une analyse bien détaillée des variabilités spatiotemporelles de précipitation fera l'un des principaux objectifs de ce chapitre.

À cause de leur topographie contrastée, les bassins versants des oueds Fès et Mikkès se caractérisent par une variation des températures entre l'amont et l'aval. Les mois les plus chauds dans la région sont juillet et août, avec des poussées de chergui, tandis que la moyenne des minima extrêmes se situe en janvier et février, caractérisés par des températures parfois négatives. Pour ce qui est le système des vents, ils sont généralement communs à tout le

territoire du Maroc, ce sont des vents Nord-Atlantiques, liés au déplacement de l'anticyclone des Açores.

1. Contexte du réseau des stations et postes d'observations climatiques

L'analyse du climat exige un réseau assez dense de stations météorologiques et de longues séries de données climatiques observées. Dans cette étude, 18 stations et postes météorologiques sont exploités, donc 8 à l'intérieur des deux bassins versants et 10 dans les zones limitrophes (Fig. 39, 40).

Postes / Station observé	Unité topographique	Bassin	Latitude	Longitude	Altitude	Gestionnaire
Fès Saïss	Plateau du Saïss Fès	Oued Fès	33.92	-4.97	570	Météorologie nationale
Fès ABHS	Plateau du Saïss Fès	Oued Fès	34.03	-5.00	410	Agence du bassin de Sebou
Sefrou	Moyen Atlas	Agay	33.82	-4.83	989	D. P. Agriculture
Ifrane	Moyen Atlas	Oued Fès	33.52	-5.10	1649	Météorologie nationale
Meknès	Plateau du Saïss	Mikkès	33.88	-5.57	487	Météorologie nationale
Aïn Bittit	Piémont (Dir)	Mikkès	33.79	-5.16	790	Agence du bassin de Sebou
Azrou	Moyen Atlas	Oum Rabie	33.43	-5.22	1275	Service des eaux et forêts
El Hajeb	Piémont (Dir)	Boufkrane	33.69	-5.37	1017	Agence du bassin de Sebou
Azzaba	Moyen Atlas	Sebou	33.86	-4.62	626	Agence du bassin de Sebou
Aït khabach	Moyen Atlas	Sebou	33.42	-4.78	1474	Agence du bassin de Sebou
Dar El Arsa	Couloir de Fès-Taza	Inaouan	34.16	-4.92	164	Agence du bassin de Sebou
Boulemane	Moyen Atlas	Sebou	33.36	-4.72	1901	D.P. Agriculture
Aïn Louh	Moyen Atlas	Oum Rabie	33.28	-5.33	1365	Service des eaux et forêts
Mikkès El Hajra	Prérif	Mikkès	34.13	-5.33	247	D.P. Agriculture
Dayet Aoua	Moyen Atlas	Oued Fès	33.65	-5.03	1477	Service des eaux et forêts
Dayet Achlaf	Moyen Atlas	Oued Fès	33.54	-5.00	1685	Service des eaux et forêts
Imouzzer Kander	Moyen Atlas	Oued Fès	33.72	-5.014	1308	Service des eaux et forêts
Ageulmam Sidi Ali	Moyen Atlas	Oued Sebou	33.08	-4.9	2085	Agence du bassin de Sebou

Tableau 18: Caractéristiques des stations météorologiques utilisées

Ces stations sont gérées par plusieurs organismes étatiques ou semi-publiques. La plupart des données proviennent de l'Agence hydraulique de Sebou (5 Stations). La météorologie

nationale gère les stations de Fès, Meknès et Ifrane. Alors que les Directions de l'agriculture et des eaux et forêts contrôlent 5 stations (Tab. 18). Du point de vue de leur distribution altitudinale, les stations observées sont assez représentatives. Leurs altitudes varient de 2085 mètres à l'amont (station Aguelmane Sidi Ali) jusqu'à 247 mètres à l'aval (station Mikkès El Hajra) (Fig.40). Nous signalons que les stations de Fès Saïss et Sefrou présentent les séries de données plus longues parmi toutes les stations, avec un siècle d'observation (1915-2015).

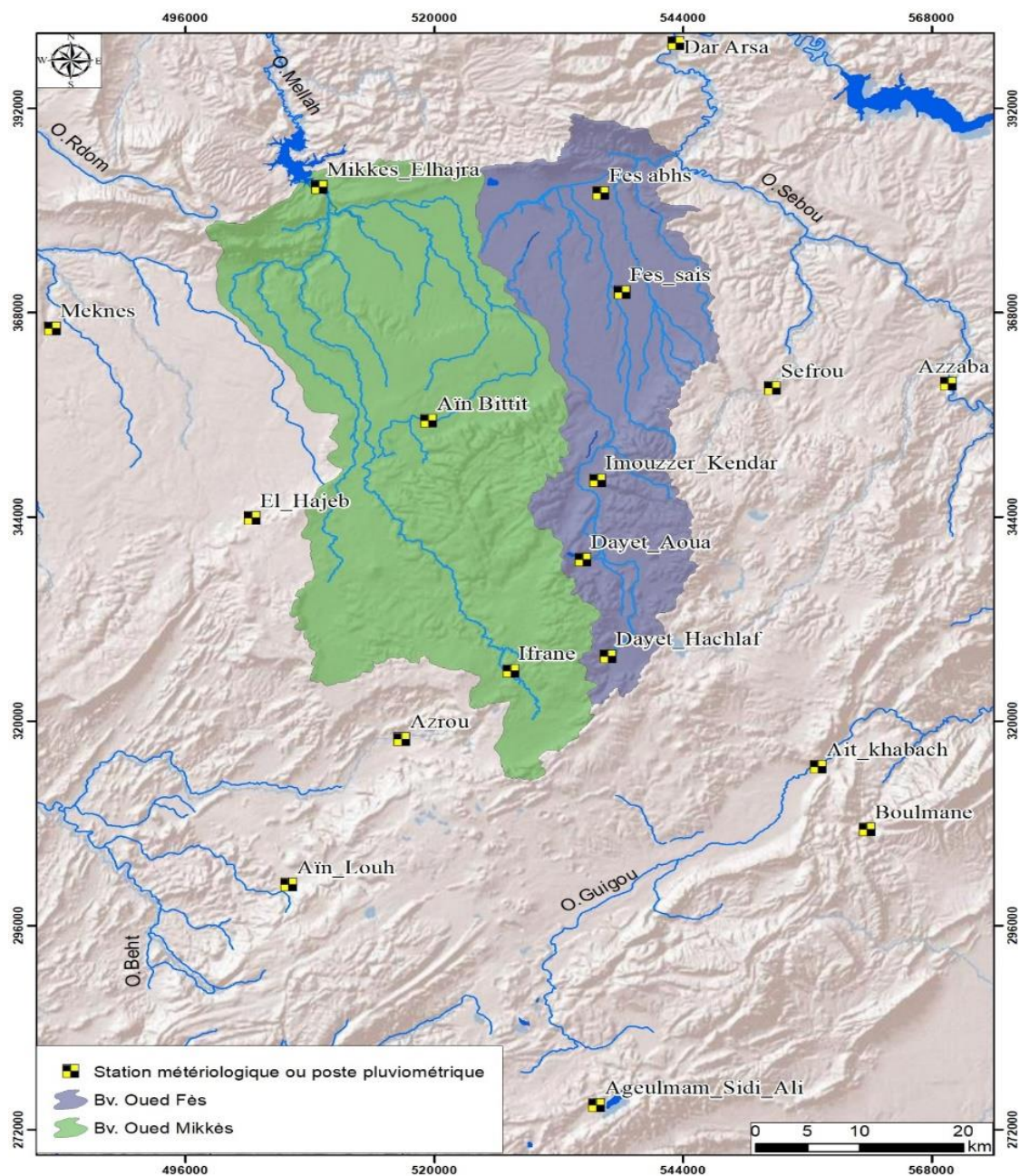


Figure 39: Localisation des stations et postes pluviométriques

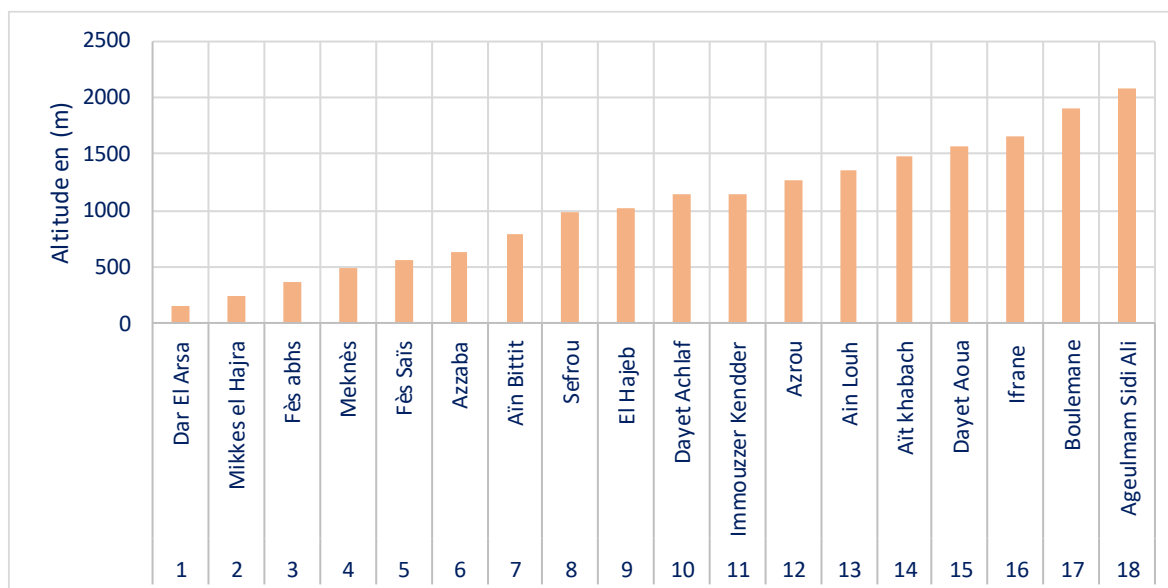


Figure 40: la situation altitudinale des stations et postes pluviométriques exploitées

2. Critique des données pluviométriques : Homogénéisation et comblements des lacunes

Selon Castellani (1986) « toute étude statistique doit avant tout s'appuyer sur un réseau d'informations fiables et contrôlées. Le contrôle des séries retenues est une étape préalable à toute analyse ». Dans cette optique, un inventaire sur la qualité des séries, a pour ambition de réaliser une analyse critique, afin d'assurer la cohérence des données au niveau régional. Pour éclairer cette étape, Alfonso et al (2003) formule les questions suivantes :

- ✓ Les séries de données utilisées sont-elles fiables ?
- ✓ Sont-elles représentatives ?
- ✓ Forment-elles un échantillon homogène ?
- ✓ Présentent-elles bien une stationnarité ?
- ✓ Est-il nécessaire de procéder à un découpage d'échantillons ?

Au Maroc, les données climatologiques (Précipitation, température, vents, évaporation...) proviennent de sources différentes. Ces données climatiques peuvent être fournies par les services météorologiques, les agences des bassins hydrauliques, les offices de l'agriculture ainsi que les eaux et forêts. Pour assurer l'homogénéité et la fiabilité des données obtenues, plusieurs méthodes et traitements sont développés par les spécialistes (hydrologue, climatologue). Ces opérations peuvent être un simple traitement primaire pour combler les lacunes ou compléter les données manquantes. L'objectif principal de ces traitements consiste à rendre la qualité des séries brute, lisible et exploitable.

Dans cet axe de l'étude, l'objectif est de combler quelques lacunes présentes et d'homogénéiser les données afin de les rendre fiables pour l'analyse du climat, notamment les précipitations dans les deux bassins versants étudiés. Cette opération est menée en trois étapes :

- Le comblement des lacunes via le modèle Vecteur Régional (MVR).
- Le test de la qualité des données via le modèle Vecteur Régional (MVR).
- Et enfin, le test d'homogénéisation des données via les méthodes des simples cumuls et doubles cumuls.

Ces trois tests seront complémentaires. Le premier test a pour objectif de combler les lacunes. Après cette étape indispensable, le deuxième vise à tester la qualité des données pluviométriques après le comblement. À la fin, le dernier test a pour objectifs de tester l'homogénéisation des données des stations observées, afin de confirmer leur fiabilité.

2.1 Comblement des lacunes via le modèle Vecteur Régional (MVR)

La méthode du vecteur régional est une méthode développée dans les années 1970 par les deux hydrologues Hiez et Brunet- Moret à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) en France. Cette méthode a pour objectif de réaliser des études d'homogénéité des séries de données et valider les régions climatiques. Elle exige trois stations complètes et homogènes dans la même région climatique et la même altitude.

L'indice régional de l'année J se calcule, sur la période comme l'observation disponible entre l'ensemble des stations de la zone d'étude par exemple :

$$V_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_{i,j}}{p_i}$$

P_{i,j} = pluie annuelle de l'année j à la station i

P_i = module interannuel de la station

Le comblement des lacunes par le vecteur régional a été réalisé sous le logiciel Hydraccess. Ce dernier a permis de calculer les indices annuels et mensuels des vecteurs régionaux. À partir de ces indices, le logiciel comble les lacunes. Le tableau 19 ci-dessous, illustre cette opération à partir de l'exemple du mois de juin à la station Fès-ABHS.

Année	Ecart/Vecteur	Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
2007	-0,27	0,273	0	1,4	2,5
2008	-0,14	0,144	0	0,7	0
2009	1,06	1,928	15	9,7	13,1
2010	0,15	0,65	4	3,3	3,4
2011	*	1,648	*	8,3	5,6
2012	*	0,432	*	2,2	6,0
2013	*	0,343	*	1,7	6,2
2014	-1,35	1,357	0	6,8	16,3
2015	0,01	1,186	6	6,0	0

Tableau 19: Comblement des lacunes par le vecteur régional (Mois juin, station de Fès (ABHS), sous Hydraccess.

NB * = Manque de données

2.2 Qualité des données et coefficient de corrélation via le Vecteur régional

Après avoir comblé les lacunes de toutes les stations observées (annexe 1), cette étape vise à tester la qualité des données. Pour cet effet, on s'est appuyé sur le critère de calcul de la corrélation par rapport au vecteur régional. Cette valeur est calculée pour chaque station par le logiciel Hydraccess.

Station	Corrélation par vecteur	Coefficient variation	Qualité /10
Fès Saïss	0.4	0.32	2.9
Fès ABHS	0.9	0.36	8.5
Sefrou	0.9	0.34	8.4
Ifrane	0.9	0.34	8.9
Meknès	0.6	0.37	7.3
Aïn Bittit	0.9	0.33	9.2
Azrou	0.8	0.33	7.7
El Hajeb	0.9	0.32	8.3
Azzaba	0.8	0.30	7.4
Ait khabach	0.8	0.28	7.5
Dar Arsa	0.9	0.34	9.2
Boulemane	0.6	0.39	8.4
Aïn Louh	0.8	0.31	8.2
Mikkès El Hajra	0.5	0.33	4.2
Dayet Aoua	0.7	0.50	3.1
Dayet Achlaf	0.8	0.31	6.4
Imouzzar Kenddar	0.9	0.34	8.7
Ageulmam Sidi Ali	0.8	0.29	7.4

Tableau 20: Coefficients de corrélation obtenus par la méthode de vecteur régional

À partir des résultats présentés dans le tableau 20 ci-dessus, on remarque que la majorité des stations ont une qualité supérieure à 7/10, c'est-à-dire qu'elles ont une bonne qualité de données, ce qui signifie que ces stations ne présentent pas un problème après leur comblement. Cependant, il faut mentionner que les stations de Fès Saïs, Mikkès El Hajra, Dayet Aoua et Dayet Hachlef, ont une mauvaise qualité. Cela est dû probablement aux erreurs d'acquisition des données, ou bien tout simplement parce que ces quatre stations ont une situation géographique influençant les quantités des précipitations par rapports aux stations voisines. Le coefficient de variation par vecteur régional des 18 postes et stations observés est présenté dans la figure 41 ci-dessous. Cette dernière montre que les stations de Fès-Saïs et Mikkès El Hajra sont les seules à avoir un coefficient de corrélation inférieur à 0.4.

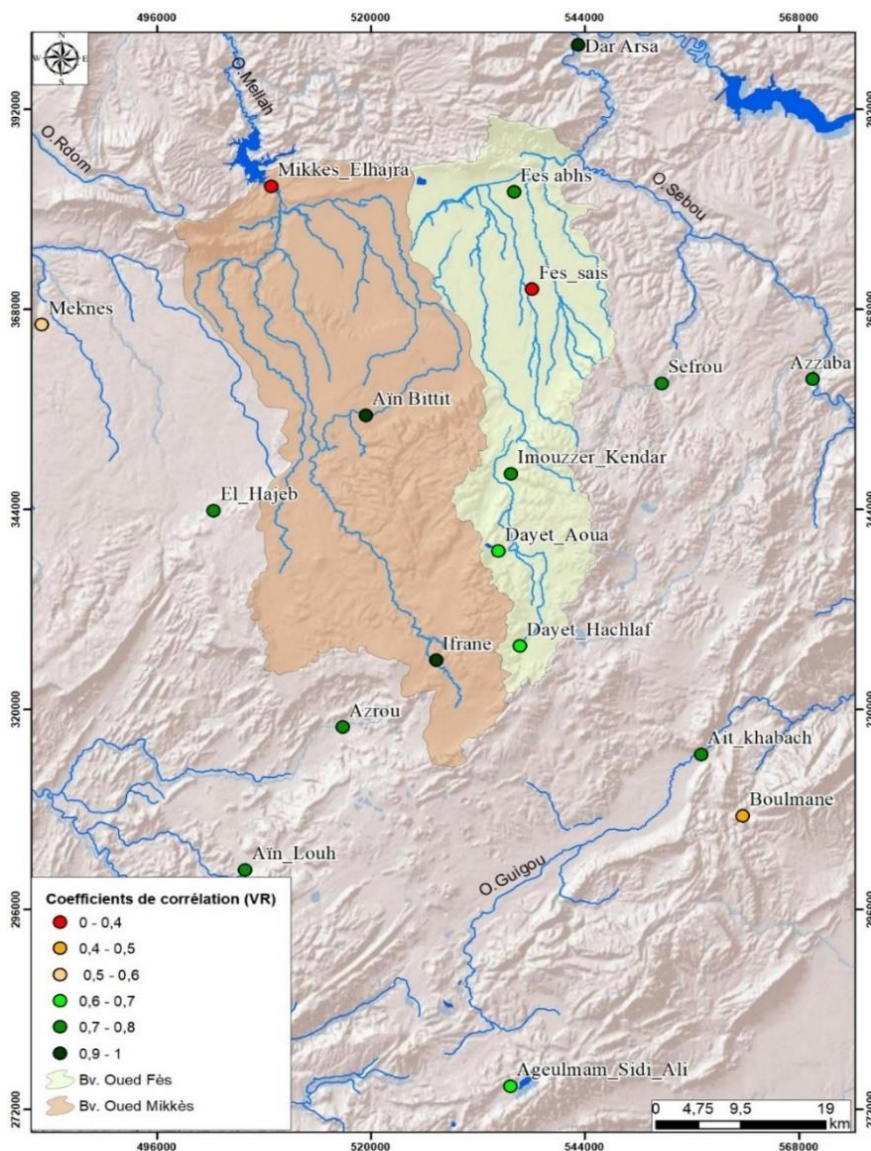


Figure 41: Résultat de la méthode du Vecteur Régional

La méthode de vecteur régional a servi à tester la qualité des chroniques de pluies annuelles sur la période retenue. Or, pour chaque station considérée, il est possible de calculer le rapport entre l'indice trouvé pour la station et l'indice régional. La moyenne des rapports ainsi établis fournit un coefficient permettant de calculer, pour chaque année, les précipitations annuelles à la station à partir des précipitations connues pour l'ensemble de la région (Boudian et al, 2011). Après la mise en œuvre à l'aide du logiciel Hydraccess®, les résultats présentés dans la figure 42, montrent que la variabilité des indices des stations par rapport à l'indice régional constitue présente des erreurs non négligeables.

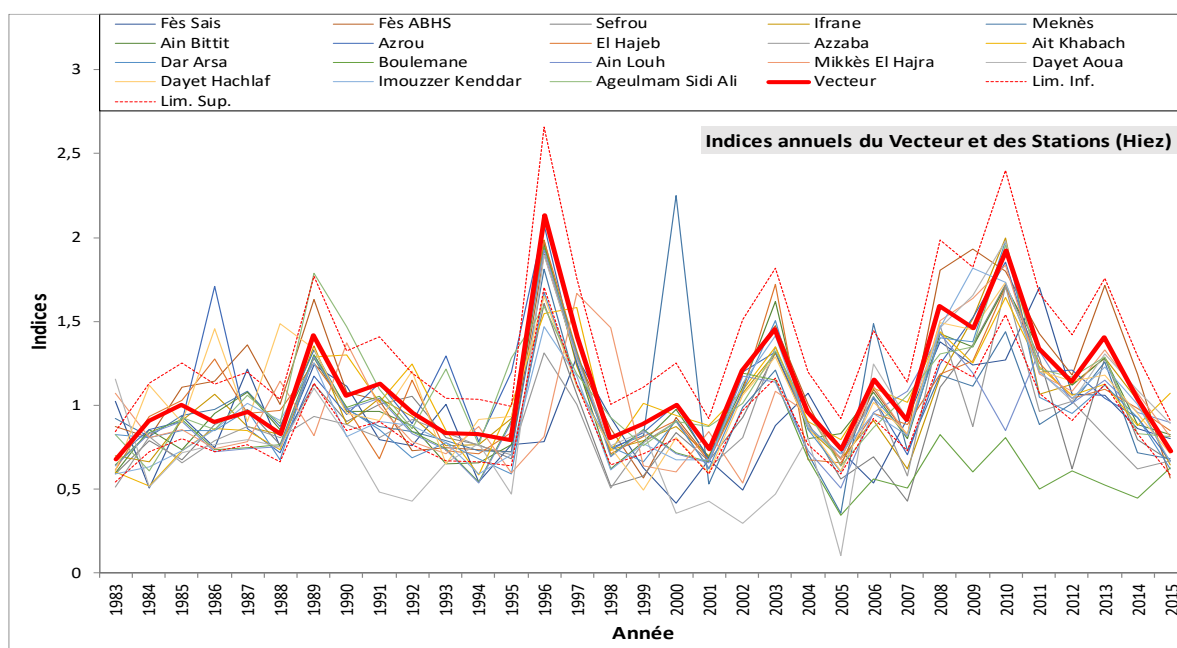


Figure 42: Vecteur des indices annuels de précipitation et indices des stations sur la période 1977-2015.

2.3 Test d'homogénéisation des données des stations observées

Pour tester d'homogénéisation de nos stations observées après être comblées. On s'est basé sur deux méthodes, à savoir : la méthode des simples cumuls et la méthode des doubles cumuls. Dans les paragraphes ci-dessous, on va présenter les résultats des tests uniquement sur les stations les plus représentatives, le reste des stations sera présenté dans l'annexe 2.

2.4 Méthode des simples cumuls

Dans un premier temps, la méthode du simple cumul sert à détecter l'homogénéisation des données observées dans la zone d'étude. Le choix des stations à tester est basé sur deux critères : la longueur des chroniques et la situation des stations observées. Vu leurs longues

durées et leurs localisations représentatives (amont et aval), les stations de Fès Saïss ; Fès ABHS ; Ifrane et El Hajeb sont exploitées pour tester leur homogénéisation.

L'application de la méthode simple cumul se base sur un cumul réalisé par ordre croissant des années d'une seule station. On obtient un alignement de points sur lequel, on peut à priori ajuster une droite de régression (Dubreuil, 1974). Elle se traduit par un changement de pente indiquant l'année de l'hétérogénéité (Linsley R., Kohler, 1949, in V.T. Chow - 1964). La pente de cette droite est en principe :

$$M = P \text{ Moyenne. } B / P \text{ Moyenne. } A$$

$$(P \text{ Moyenne } A - \text{ pluies moyennes du poste } A)$$

Dans notre cas, le test de simple cumul a représenté le cumul des pluies annuelles enregistrées dans les quatre stations à contrôler en fonction des années (Fig. 43 ; 44 ; 45 et 46). La linéarité du graphique représente un très bon indice d'homogénéité ($R^2 = 0.997$ dans station de Fès Saïs ; 0.988 pour Fès ABHS ; 0.998 pour Ifrane et 0.996 dans station d'El Hajeb). Donc, on peut dire alors que les séries de données des stations testées sont assez homogènes (les autres stations dans l'annexe 3).

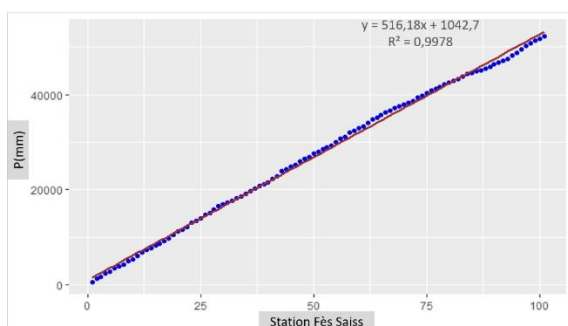


Figure 43: Simple cumul de la station de Fès Saïss (1915-2015).

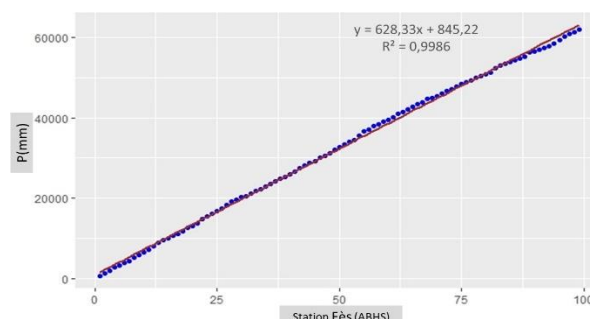


Figure 44: Simple cumul de la station de Fès (ABHS) (1972-2015).

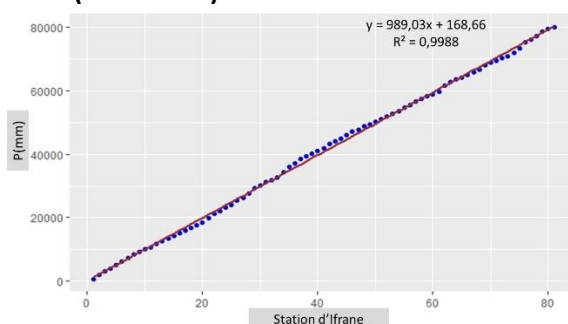


Figure 45: Simple cumul de la station d'Ifrane (1935-2015).

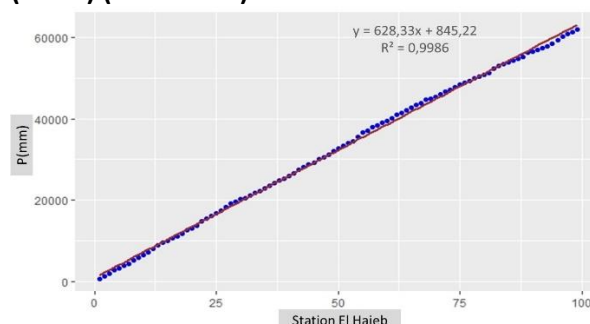


Figure 46: Simple cumul de la station d'El Hajeb (1915-2015).

2.4.1 Méthode des doubles cumuls

La deuxième méthode des doubles cumuls est plus puissante et efficace. L'homogénéisation par cette technique graphique nécessite la connaissance d'une série de données annuelles homogènes et fiables, observées dans une station de référence dite station de témoin. Cette méthode permet de détecter la présence d'une anomalie dans la série testée. Dans notre cas, on a utilisé 8 stations représentatives, dont 4 sont très homogènes (Fès ABHS et Fès Saïs ; El Hajeb et Ain Bittit ; Imouzzet Kander et Ifrane ; Ain Leuh et Azrou). La méthode du double cumul, n'a détecté aucune hétérogénéité (Fig. 47, 48, 49, 50).

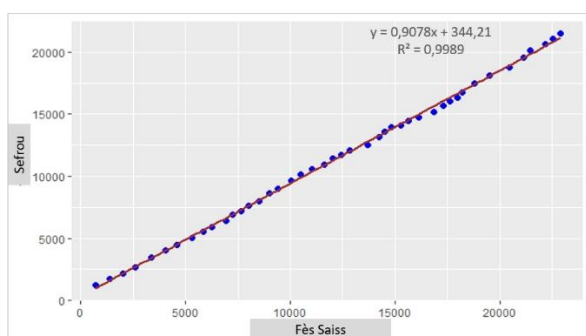


Figure 47: Double cumul pour la station de Fès (ABHS) et Fès Saïs (1972-2015)

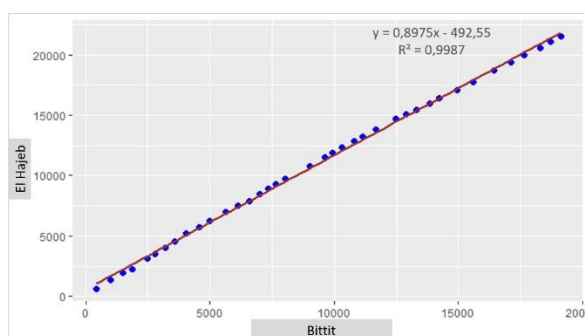


Figure 48: Double cumul pour la station d'El Hajeb et Ain Bittit (1978-2015)

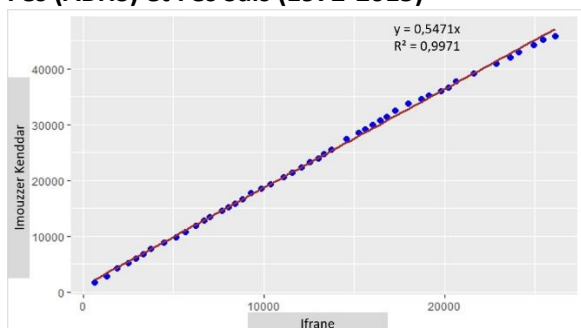


Figure 49: Double cumul pour les stations d'Imouzzet Kander et Ifrane (1969-2015)

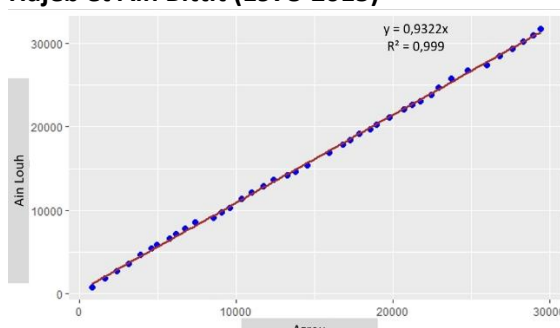


Figure 50 : Double cumul pour les stations d'Ain Louh et Azrou (1975-2015)

Généralement, la critique des données est une étape indispensable. Après le comblement des lacunes et le test de la qualité des données, l'utilisation des méthodes doubles cumuls et simples cumuls ont permis de tester l'homogénéité des données pluviométrique de toutes les stations observées.

À partir de ces tests, on peut dire que les données observées sont assez homogènes. De ce fait, on peut estimer qu'elles sont assez fiables pour garantir une bonne analyse des variations spatio-temporelles des précipitations.

3. Variabilité spatio-temporelle des précipitations

Le terme des précipitations englobe tous les météoriques, mesurées dans leurs hauteurs de la lame d'eau et recueillie par le pluviomètre, quel que soit la nature de cette eaux (Pluie, neige, grêle etc. (Malardel, 2005). Dans cet axe, l'accent sera mis sur l'étude de la pluie et sa variabilité temporelle et spatiale. Ce type de précipitation (pluie) constitue un facteur primordial dans le régime hydrologique des deux bassins versants.

Pour approcher l'impact des précipitations sur le régime hydrologique, il est nécessaire de cerner les caractéristiques de la variabilité temporelle et spatiale de ce facteur. Dans ce cadre, Obda, 2004 a souligné qu'il y a plusieurs méthodes pour calculer le degré de la variabilité temporelle des précipitations. Le coefficient de variation, l'intervalle de variation, l'écart absolu moyen, les déciles, les quantiles, le coefficient d'irrégularité K3, l'analyse fréquentielle, les calculs des périodes de retour, etc... sont tous des expressions et des méthodes indispensables dans les études de la variation de précipitations.

Pour analyser les caractéristiques des apports pluviométriques touchant les deux bassins étudiés ; nous nous sommes basés sur les dix-huit stations présentées et critiquées précédemment. Il faut mentionner que cette analyse des apports pluviométriques sera basée sur l'échelle de l'année hydrologique. Car, au Maroc, l'année hydrologique _choisie par les services de l'hydraulique_ est liée à l'année climatique ou à l'année agricole déterminée du mois de septembre au mois d'août. Le découpage de l'année hydrologique, comme dans presque tous les pays méditerranéens, ne tient pas compte des nuances dues à l'existence de secteurs géographiques variés. Donc, nous effectuerons cette étude à l'échelle de l'année hydrologique.

3.1 La variabilité annuelle des apports pluviométriques

D'après une lecture générale des données observées dans le réseau des stations et postes pluviométriques, le premier constat qui saute aux yeux, c'est la grande variation spatiale et temporelle des précipitations caractérisant les deux bassins versants étudiés. La pluie moyenne annuelle enregistrée dans les 18 stations et postes pluviométriques observés, montrent que les apports pluviométriques annuels augmentent de l'aval vers l'amont. Parmi tout le réseau d'observation couvrant la zone d'étude, le choix des stations à analyser se limite

à quatre stations. Ce choix est justifié par la longue série d'observation disponible au niveau des quatre stations, ainsi que leurs localisations représentant les différentes parties de la zone d'étude. C'est stations sont :

- ✓ La station de Fès (1972/2015) située dans la partie aval du BV oued Fès, avec une altitude de 378 m.
- ✓ La station de Fès Saïss (1915/2015) au centre du BV oued Fès du plateau de Saïss, avec une altitude de 570 m.
- ✓ La station d'Aïn Bittit (1978/2015) située à la partie médiane du BV oued Mikkès, au niveau du dir d'El Hajeb, avec une altitude de 790 m.
- ✓ La station météorologique d'Ifrane (1935/2015) à l'amont du BV oued Mikkès, dans une altitude de 1649 m.

D'après la station de Fès Saïss qui enregistre un siècle de précipitations (Fig. 51), l'irrégularité des pluies d'une année hydrologique à l'autre est très marquante. Sur les 100 années observées, on peut remarquer une grande fluctuation entre les années humides et sèches. Ces tendances seront étudiées davantage, plus loin dans ce chapitre.

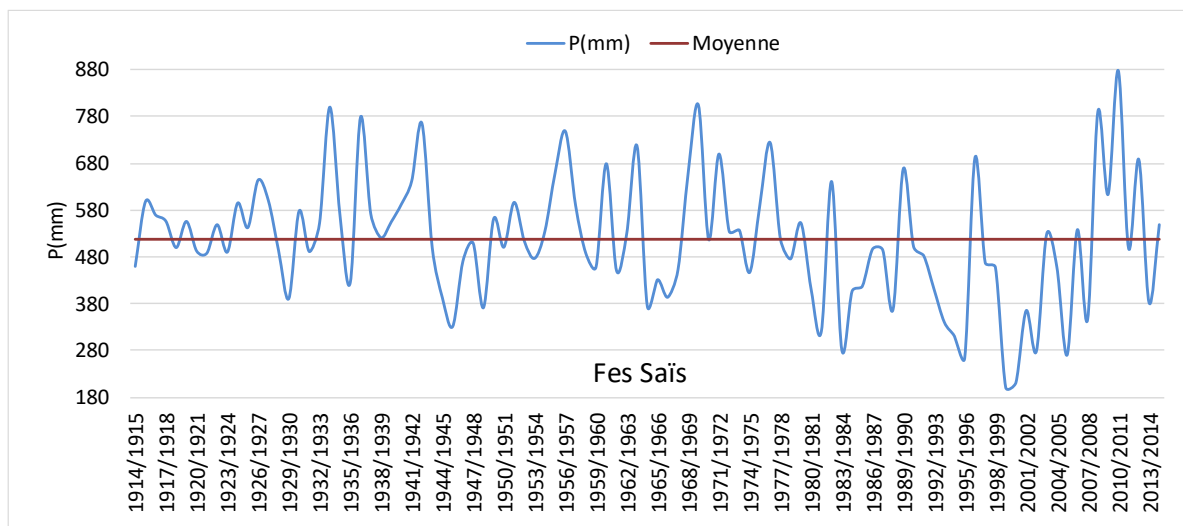


Figure 51: variabilité des totaux annuels des précipitations par rapport à la moyenne de la station de Fès Saïss pour la période de (1914/1915) - (2014-2015)

En général, l'année hydrologique 1980-1981 marque une période transitoire de l'humide vers le sec. En 2000, la station de Fès Saïss n'a enregistré que 206 mm, alors les précipitations ont dépassé 800 mm en 1933-1934. Plus récemment, la fin de la première décennie du 21ème siècle est marqué par un retour de l'humidité, qui a marqué le territoire national en général. En 2009-2010, la station de Fès Saïss enregistre le record absolu, avec 878 mm.

L'amont des BVs a connu la même tendance. À partir des données de la station météorologique d'Ifrane (Fig. 53), la variabilité des pluies annuelles est aussi remarquable. La valeur maximale a été enregistrée en 2009-2010, avec 1876 mm ; et 583mm comme valeur minimale, enregistrée en 2006-2007.

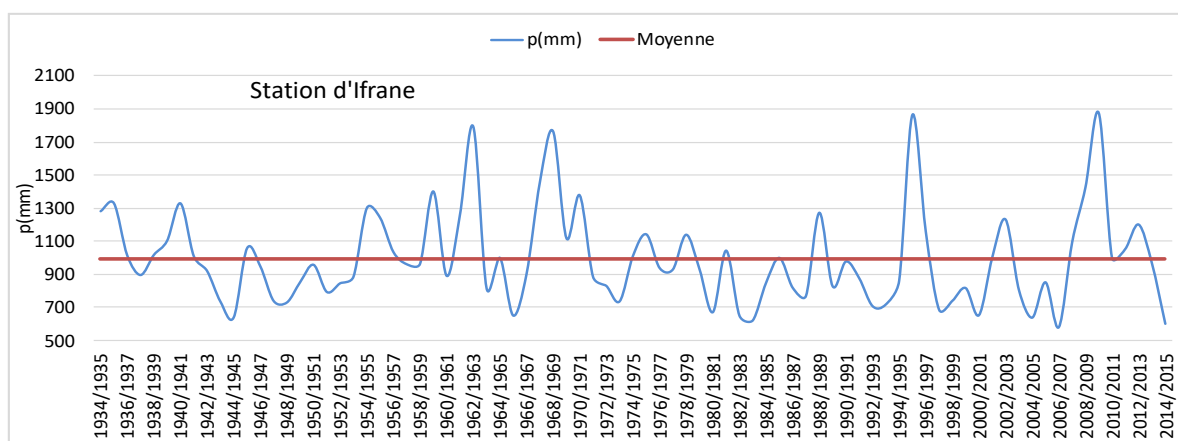


Figure 52: variabilité annuelle des précipitations par apport à la moyenne de la station d'Ifrane pour la période de (1934/1935) - (2014-2015).

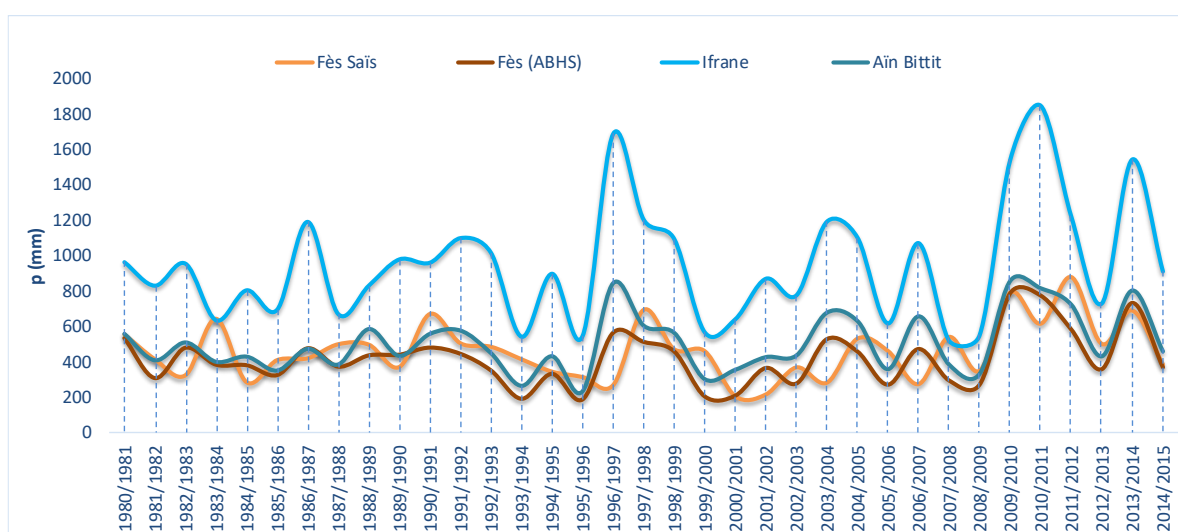


Figure 53: variabilité annuelle des précipitations. (Ifrane, Fès (ABHS) Aïn Bittit, Fès Saïss) (1980-1981/2014-2015)

En ce qui concerne la variation spatiale des apports pluviométriques, d'après les précipitations annuelles des quatre stations observées (Fig. 53), la station d'Ifrane est la plus arrosée, avec une moyenne annuelle de 951 mm (1980-2015). L'aval des BVs reçoit la moitié de la lame d'eau précipitée à l'amont. En effet, la moyenne annuelle de la station de Fès (ABHS) ne dépasse pas 417 mm (1980-2015), alors que la station de Fès Saïss reçoit 457 mm et 508 mm comme moyenne annuelle à la station d'Ain Bittit durant la même chronique.

3.2 La variabilité mensuelle des apports pluviométriques

L'étude des précipitations moyennes mensuelles, mène à la connaissance de la répartition des pluies au cours d'une année hydrologique. Pour avoir une idée générale sur la variabilité mensuelle des apports pluviométriques, quatre autres stations sont analysées pour cet effet.

Comme le cas des pluies annuelles, les précipitations mensuelles marquent également une grande variabilité, à la fois spatiale et temporelle. La répartition des précipitations moyennes mensuelles des stations étudiées est décroissante de l'amont des bassins versants vers l'aval. La période arrosée et humide commence en octobre et se termine en avril. Par contre les mois secs commencent du mois de mai et durent jusqu'à la fin de septembre. Pour les 8 stations analysées (Fig. 54), le mois de janvier enregistre la pluviométrie la plus importante des années hydrologiques observées. La moyenne mensuelle de janvier atteint 142 mm à Ifrane ; 66 mm à Fès Saïss et à Aïn Bittit et 74 mm à la station d'Imouzzzer Kander. Le Tableau 21 récapitule la variabilité des moyennes mensuelles des 8 stations localisées au sein de la zone d'étude.

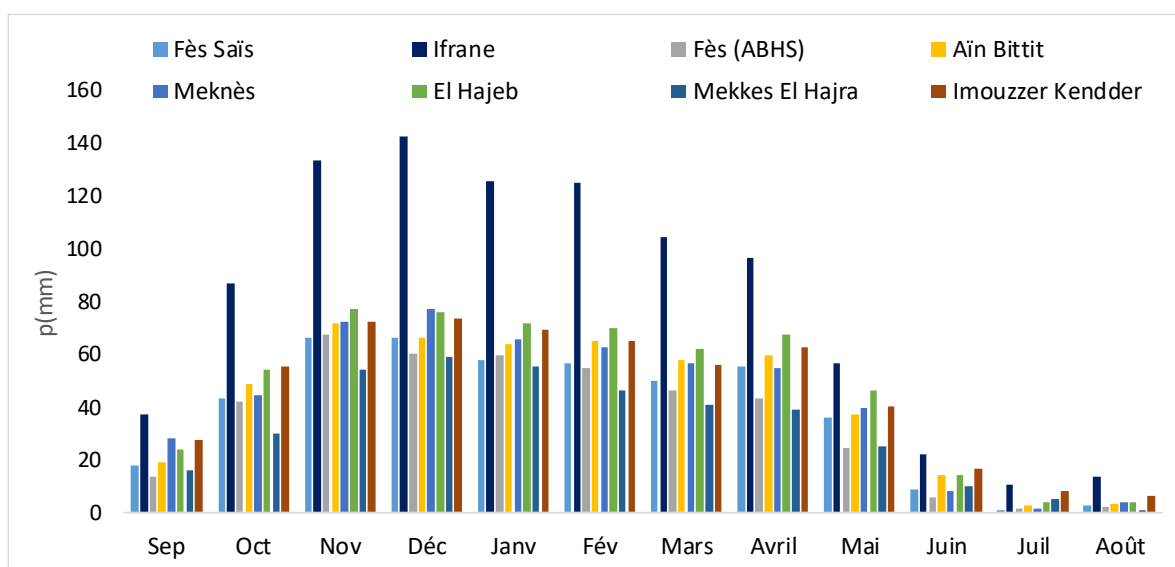


Figure 54: Moyenne mensuelle de la période de (1979/1980-2014-2015)

	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
Fès Saïss	18	43	66	66	57	57	50	55	36	9	1	2
Ifrane	37	87	133	142	125	125	104	96	56	22	11	14
Fès (ABHS)	13	42	67	60	59	54	46	43	24	6	2	2
Aïn Bittit	19	48	72	66	64	65	57	59	37	14	3	3
Meknès	28	45	72	77	65	62	56	55	40	8	1	4
El Hajeb	24	54	77	76	71	70	62	67	46	14	4	4
Mikkès El Hajra	16	30	54	59	55	46	41	39	25	10	5	0
Imouzzzer Kander	28	55	72	74	69	65	56	62	40	16	8	6

Tableau 21: Moyenne mensuelle de la période 1979/1980-2014/2015

Par ailleurs, l'extraction des valeurs mensuelles maximales enregistrées dans les stations analysées, donne des indices sur la répartition spatio-temporelle de la pluviométrie sur la l'aire d'étude. Comme étant la zone la plus arrosée, l'amont des BVs enregistre également les précipitations mensuelles maximales (Fig.55). Les pluies du mois de janvier peuvent dépasser 540 mm. En janvier 1996, la station d'Ifrane a enregistré 544 mm. En décembre 1996, la station de Dayet Aoua a reçu 500 mm. Les autres stations enregistrent également les maximums mensuels en périodes hivernales. Cependant, les mois d'automne reçoivent également de grandes quantités de pluies. Par exemple, la station d'Imouzzet Kander a enregistré 239 mm en septembre 2009. En été, les apports pluviométriques sont assez faibles, mais parfois très concentrées. En mois de juillet 2010, la station de Dayet Aoua a reçu 93 mm.

Les autres stations en aval, enregistrent des maximums mensuels, dépassant que rarement la barre de 200 mm/mois, notamment pendant la saison humide. En été, les précipitations mensuelles ne dépassent pas 50 mm.

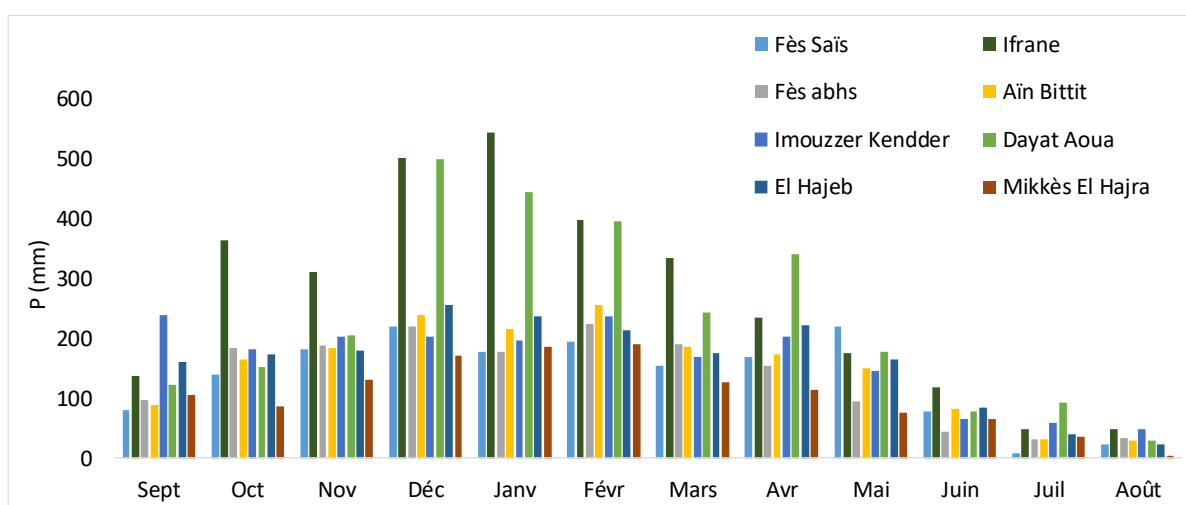


Figure 55: Précipitations mensuelles maximales (1978-1979 /2014-2015)

Du point de vue interannuel, les pluies maximales mensuelles suivent la même tendance des plus annuelles présentées ci-dessus. Les maximums mensuels présentés dans la figure 66 ci-dessous, sont concentrés dans l'année exceptionnellement humide de 1996, ainsi que les dernières années, à partir de 2008. Nous signalons ici que les années 2016 à 2019 ne sont pas assez humides. Ces années ne seront pas analysées dans ce chapitre à cause du manque des données.

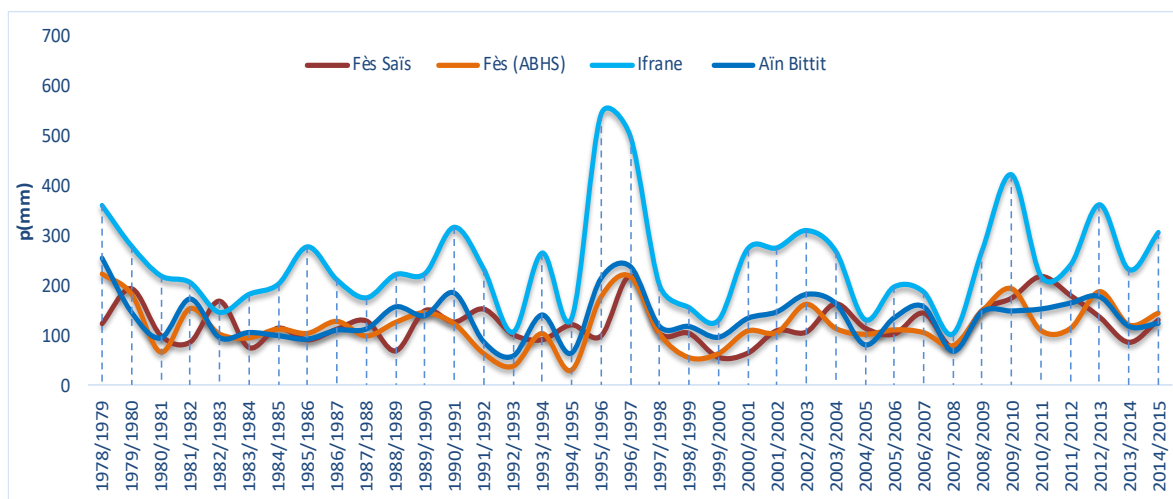


Figure 56: Pluie maximale mensuelle interannuelle (1978/1979-2014/2015)

En général, l'analyse des pluies mensuelles est très pertinente dans le cadre de cette étude. Cette analyse permet d'accumuler des conclusions concernant la répartition spatiale et temporelle des apports pluviométriques caractérisant les deux bassins versants.

Nous rappelons que les mois de décembre et janvier enregistrent les valeurs maximales. Les moyennes mensuelles minimales se localisent en juillet avec une moyenne qui ne dépasse pas 1,5 mm à Fès (ABHS). En outre, quoique la période estivale soit sèche, les mois de juin et août reçoivent parfois une grande quantité de pluies, grâce aux orages et/ou aux perturbations du début et de la fin de l'été.

En conclusion, les irrégularités annuelles et mensuelles des pluies dans les deux bassins versants étudiés montrent un régime pluviométrique extrêmement variées d'une station à l'autre ; d'une année à l'autre et d'un mois à l'autre. Selon les résultats obtenus, les périodes sèches commencent toujours du mois juin à septembre. Ces période sèche se caractérisent par un déficit pluviométrique, mais avec des averses orageuses très concentrées et brutales dans le temps et l'espace pouvant déclencher un écoulement même dans les oueds secs surtout les oueds de Chkou et Tizguit. Les périodes humides commencent en octobre jusqu'en avril ; et ont un grand impact sur le régime hydrologique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès (Chapitre 3).

3.3 La répartition saisonnière

L'étude de la variation saisonnière des pluies dans la zone d'étude a une grande importance dans la compréhension du régime climatique. Dans toutes les stations étudiées, les

précipitations se concentrent en hiver et l'automne (Fig.57), ce sont les saisons les plus humides. Les valeurs varient d'une station à l'autre. Celles en amont enregistrent des moyennes élevées par rapport aux stations qui se localisent en aval.

Globalement, les précipitations moyennes s'accumulent en hiver, avec une moyenne hivernale de 392 mm à Ifrane, 354 mm à Dayet Aoua, 207 mm à Imouzzet Kander et 180 mm à Fès Saïss durant la période 1978/1979-2014/2015.

Le printemps et l'automne reçoivent plus ou moins la même quantité de précipitations, avec une moyenne printanière de 257 mm à Ifrane, 205 mm à Dayet Aoua, 159 mm à Imouzzet Kander et 141 mm à Fès Saïss toujours pour la même période (1978/1979-2014/2015). Il faut mentionner ici, que les précipitations automnales et printanières se différencient au niveau de leurs intensités. En effet, l'automne reçoit des épisodes pluvieux de fortes intensités, qui sont à l'origine des perturbations atmosphériques qui caractérisent la zone d'étude à partir du mois de septembre. C'est pourquoi, la plupart des inondations ont été enregistrés durant cette période (Lasri, 2015). L'été, quant à lui, se caractérise par des précipitations très faibles. La moyenne estivale ne dépasse pas 9 mm à la station de Fès Saïss, 46 mm à la station d'Ifrane et 21 mm à la station d'El Hajeb (Tab.22).

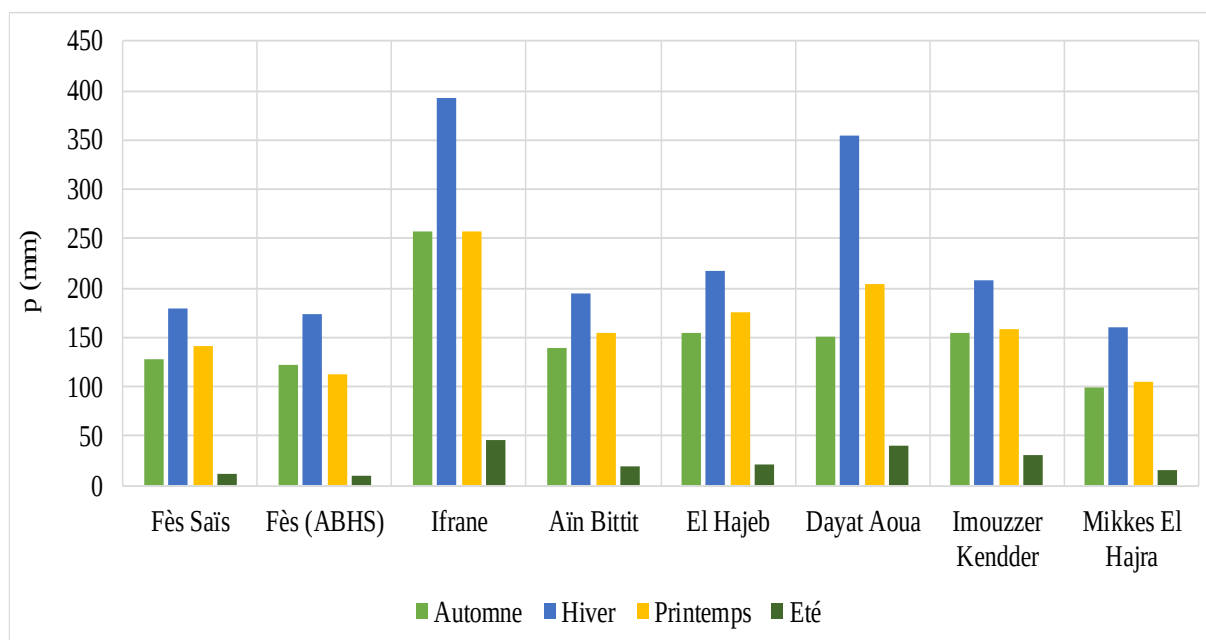


Figure 57: Distribution des précipitations moyennes saisonnière. (1978/1979-2014/2015)

Station et poste	Automne	Hiver	Printemps	Été
Fès Saïs	128	180	141	12
Fès (ABHS)	122	174	113	9
Ifrane	257	392	257	46
Aïn Bittit	139	195	154	20
El Hajeb	155	217	176	21
Dayet Aoua	150	354	205	40
Imouzzar Kander	155	207	159	30
Mikkès El Hajra	100	160	105	15
Tableau 22: Distribution des précipitations moyennes saisonnières. (1978/1979-2014/2015)				

Par ailleurs, la répartition saisonnière des précipitations saisonnières se caractérise par une grande variabilité. Pour bien illustrer cette variabilité, une spatialisation des pluies moyennes saisonnières est présentée ci-dessous. Pour cet effet, une investigation de la spatialisation des séries de données a pour objectif de caractériser chaque région par son régime climatique. Il existe plusieurs méthodes géostatistiques de spatialisation des données ponctuelles, à savoir : Krigeage (Lebel et Laborde, 1988) ; Spline (Roy, 2007) ; Pondération par l'inverse de la distance ; Spline avec interruptions ; Par voisins naturels ; Tendance...etc. La méthode adoptée pour la spatialisation des moyennes saisonnière consiste à interpoler les précipitations enregistrées durant la période (1978/1979-2014/2015) pour chaque station, via la méthode IDW. À l'exception de l'été, les précipitations moyennes saisonnières hivernales, automnales et printanières se concentrent dans les stations les plus élevées par rapport aux autres zones. Les stations d'Ifrane et Dayet Aoua dans le causse Moyen Atlasique donnent une grande indication du rôle des reliefs dans le régime climatique dans la zone d'étude, puisque l'amont reçoit le double plus de précipitation enregistrée en aval (Fig. 58, 59, 60, 61). Par ailleurs, malgré les faibles quantités de pluies, l'analyse de la distribution spatiale des pluies estivales est très intéressante. Le contraste des moyennes saisonnières est moins prononcé, ainsi que les valeurs maximales sont enregistrées au niveau de la dépression d'Ait Khabach qui est largement moins arrosée par rapport aux zones limitrophes. Ce phénomène est expliqué par le rôle de l'abri orographique qui joue un rôle déterminant la distribution spatiale des précipitations (orages estivaux). Généralement, le contraste spatial de la pluviométrie de l'amont vers l'aval est dominant pendant toutes les saisons, mais avec une petite différence d'une saison à une autre, surtout à l'amont. Ce contraste entre l'amont et l'aval est expliqué par le rôle des reliefs et des masses d'airs humides.

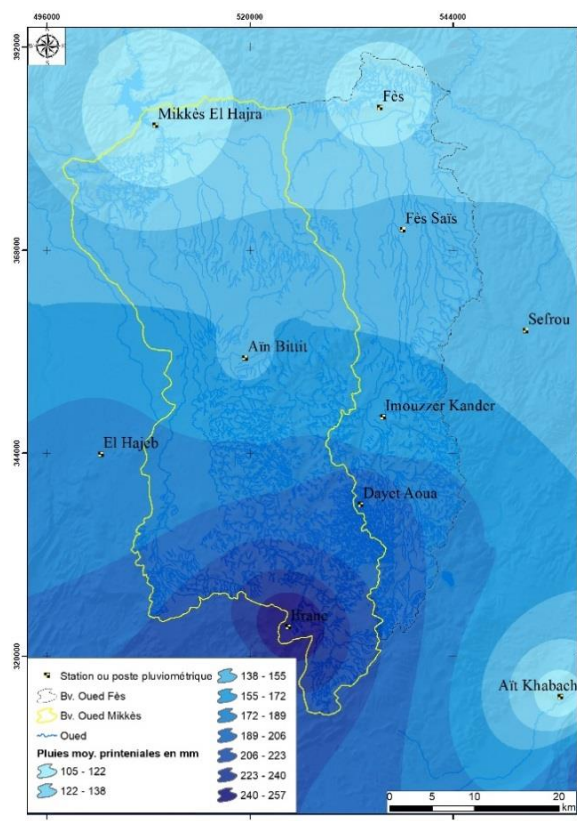


Figure 58: Les pluies moyennes printanières de la période (1978/1979-2014/2015)

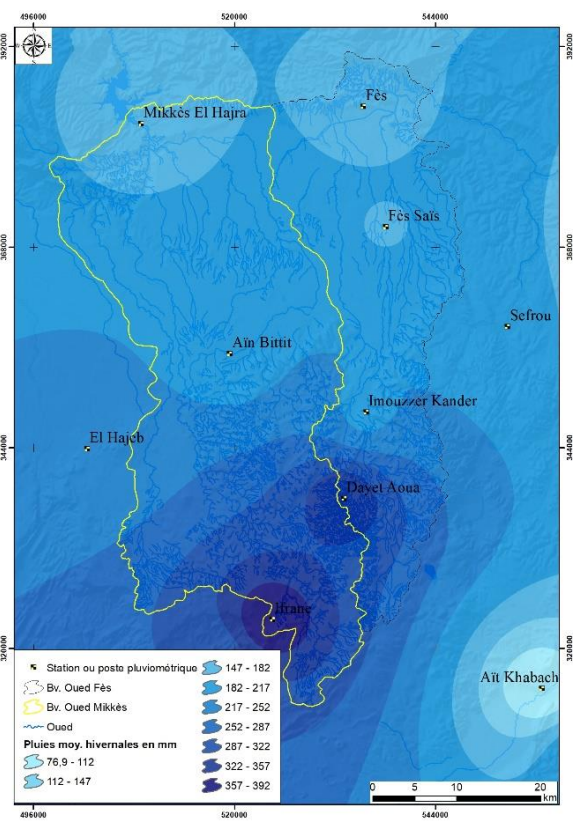


Figure 59: Les pluies moyennes hivernales de la période (1978/1979-2014/2015)

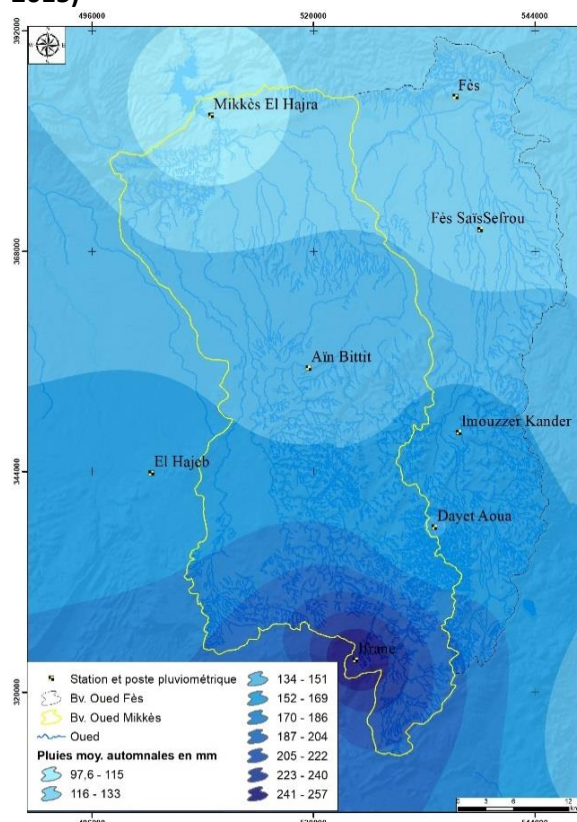


Figure 60: les pluies moyennes automnales de la période (1978/1979-2014/2015)

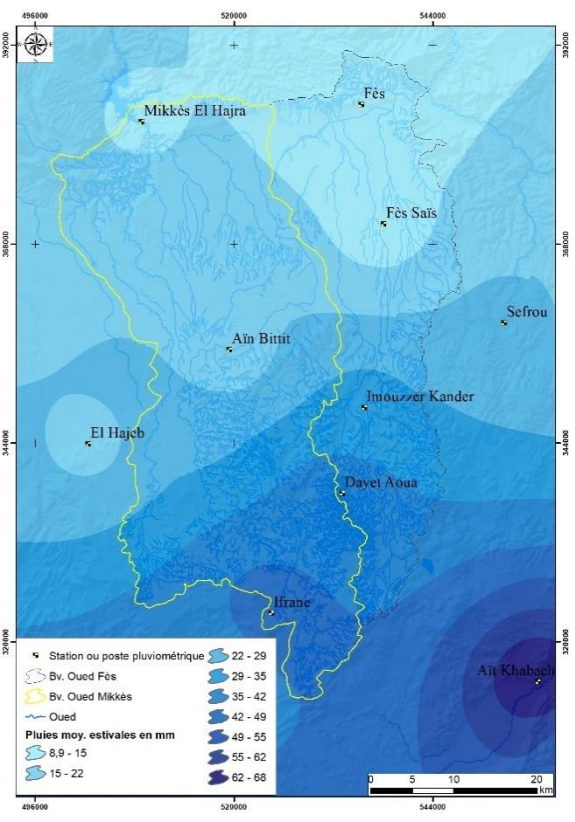


Figure 61: Les pluies moyennes estivales de la période (1978/1979-2014/2015)

4. Analyse des tendances des précipitations

Dans cet axe, l'accent sera mis sur l'analyse des tendances des précipitations entre l'humide et le sec. Pour cet effet, la méthode CUSUM sera exploitée.

4.1 Mise en route CUSUM

Selon plusieurs chercheurs dans le domaine de hydroclimat, la fonction CUSUM (Brunet-Moret, 1971 ; Lettenrayer, 1976) représente l'écart des valeurs cumulées observées par rapport à celle de la droite moyenne (droite de référence). Selon Lang, 2007, la fonction CUSUM est une méthode statistique issue de la méthode du simple cumul. Elle caractérise aussi la période étudiée en définissant le nombre d'années sèches, d'années humides et en détectant les sauts de moyennes. Elle considère la fonction qui au temps « t » associe CUSUM (t) telle que pour une série ($x_1, x_2, \dots, x_n$).

$$CUSUM(T) = c(t) = \sum_{u=1}^{u=t} x_1 - \frac{T}{m} \sum_{u=1}^{u=m} x_1 \text{ avec } 2 \leq m \leq N$$

Où (m) est le rang de X_i et N , l'effectif de la série.

Cluis, 1987 propose de prendre $m = N$, soit ; Où $\bar{X}$ est la moyenne de l'échantillon. Il convient ensuite de fixer une bande passante optimisée qui tient compte à la fois des fluctuations de la moyenne et de l'écart type des séries (Warin, 1994). L'extremum C_{ext} de cette bande passante est défini par :

$$C_{ext} = \pm \sigma \left(\frac{u\sqrt{N}}{4} + \frac{U^2}{2\sqrt{2}} + \frac{U^2}{8\sqrt{N}} \right)$$

Où σ est l'écart type de la série et U la variable réduite de Gauss à 0.95 (François et al. 1993). Il détermine aussi l'hétérogénéité interne de la série des stations étudiées, se fondant sur la définition d'un intervalle de confiance (bande passante C_{ix}) (François et al., 1993) (Fig.62).

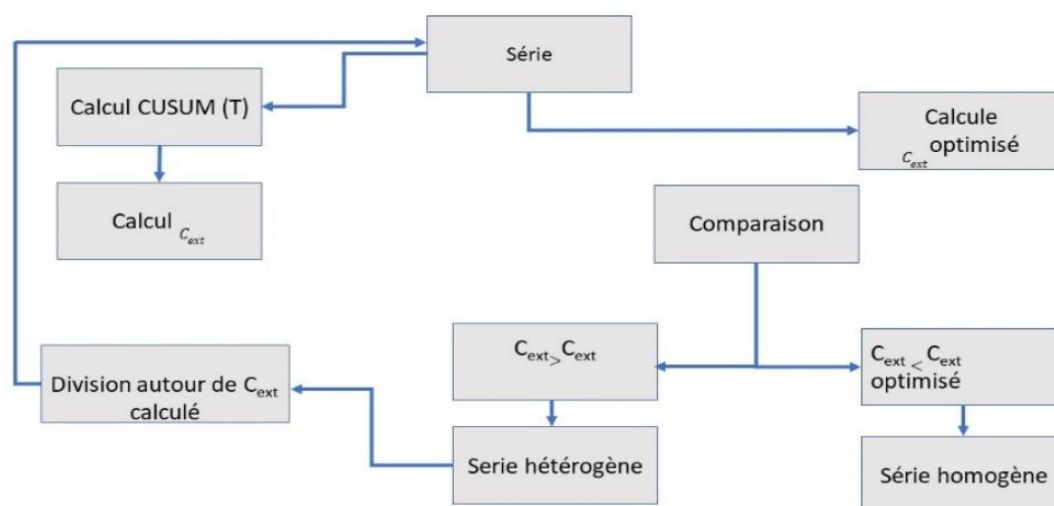


Figure 62: Schéma simplifié le Cext et leur fonction sur l'hétérogénéité des séries de données

4.1.1 CUSUM de Fès Saïss et Sefrou

Le choix des stations de Fès Saïss et Sefrou est justifié par la longue série chronologique des plus annuelles dépassant 100 ans. La méthode du CUSUM, par la variable C_j illustre très clairement les tendances sèches et humides du climat depuis le début du siècle dernier pour les données des deux stations analysées. Pour aller plus loin dans la recherche des tendances, la méthode de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989) a été appliquée à partir du logiciel « Khronostat ». Elle a découpé la chronique de la station de Fès Saïss en trois périodes 1915/1980, 1981/2007 et 2008/2015, et la station de Sefrou en deux périodes homogènes.

Station	Période	Moyenne	Écart type
Fès Saïss	1915/1980	549	131
	1981/2007	415	118
	2008/2015	587	146
Sefrou	1915-1979	639	121
	1980-2015	487	165

Tableau 23: Résultat du découpage des données de pluies annuelles de la station de Fès Saïss, et Sefrou par la méthode de segmentation de Hubert. (Période : 1914-1915/2014-2015)

La valeur C_j est calculée pour chaque année des deux stations de Fès Saïss et Sefrou. La courbe résultante dans les figures 63 et 64 suivantes illustre le cumul des écarts normés par rapport à la droite de la référence. Cette méthode a été appliquée dans plusieurs recherches, notamment par (Nejjari, 2002), (Gille et François, 2001), (Sary et Akdim, 2001), (Obda, 2004) et (Qadem, 2015) dans le Moyen Atlas, et ont obtenu presque les mêmes résultats indiquant les mêmes tendances.

L'utilisation d'une méthode de segmentation (Hubert et al., 1989) est venue compléter et relativiser les résultats précédemment obtenus. La figure 63 qui présente le CUSUM des précipitations à la station de Fès Saïss montre que la une moyenne de la période homogène 1915/1980 est dans l'ordre de 549 mm. Cette moyenne a diminué à 415 mm entre 1981 et 2007. Pour monter encore à 587 mm entre 2008 et 2015 (Fig. 63). Pour la station de Sefrou la période de 1915-1979 a une moyenne de 639mm et la période de 1980-2015 a une moyenne de 487mm (Fig. 64).

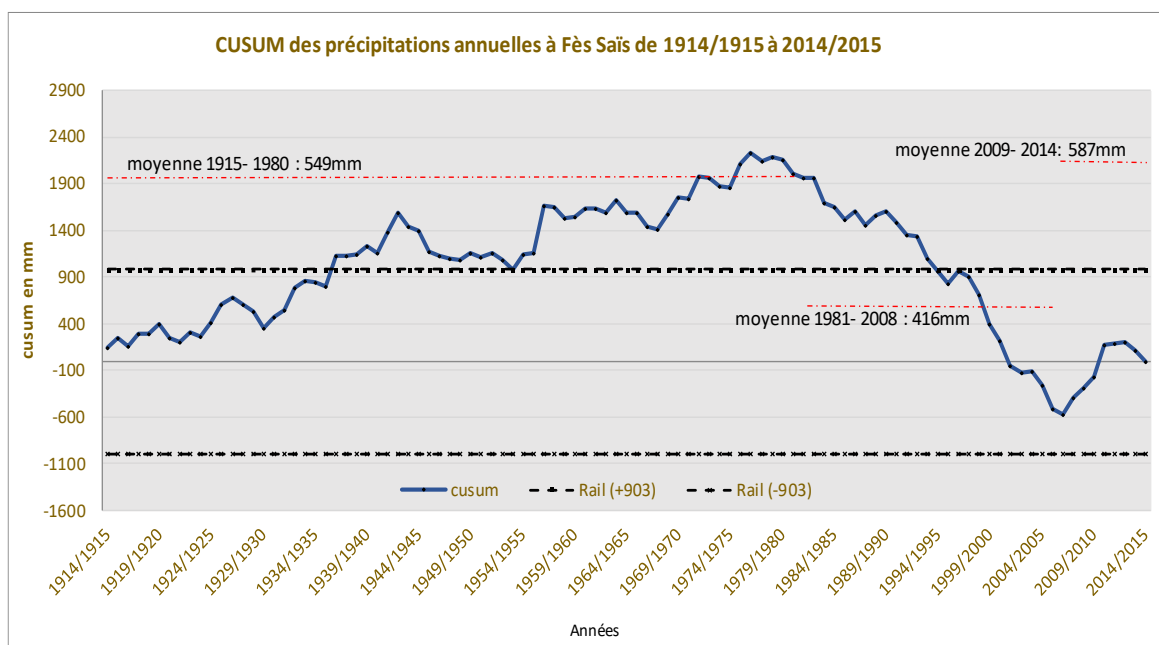


Figure 63: CUSUM des précipitations à la station de Fès Saïss (1915-2015) et moyenne pour les 3 périodes homogènes (100ans).

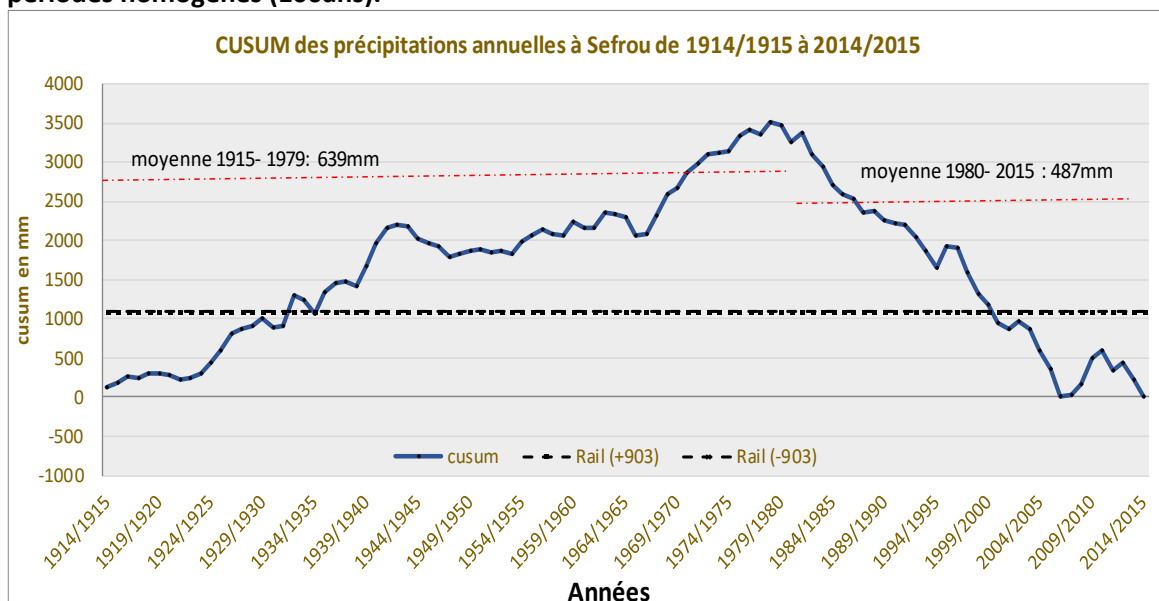


Figure 64: CUSUM des précipitations à la station de Sefrou (1915-2015) et moyenne pour 2 période homogènes (100 ans).

5. Analyse fréquentielle des précipitations annuelles

L'analyse fréquentielle des précipitations annuelles reste l'une des méthodes primordiales dans les traitements des données climatiques. Meylon, 2008 et Giret, 2007 soulignent que cette analyse mène à bien comprendre les événements extrêmes et le probabilisme des événements au futur. Cette méthode doit être compatible avec une loi d'ajustement qui serait convenable à la distribution de la pluviométrie annuelle. Dans cette loi, on utilise les paramètres d'ajustement qui se base sur les pluies moyennes annuelles et les écarts types. Ensuite, la variable réduite sera déterminée afin de calculer les différentes parts de pluies. L'étude des pluies fréquentielles caractéristiques nécessite l'arrangement des valeurs de pluie par ordre croissant ou décroissant, en donnant à chaque variable son rang dans la série. Dans une deuxième phase, le calcul des fréquences correspond à la formule suivante :

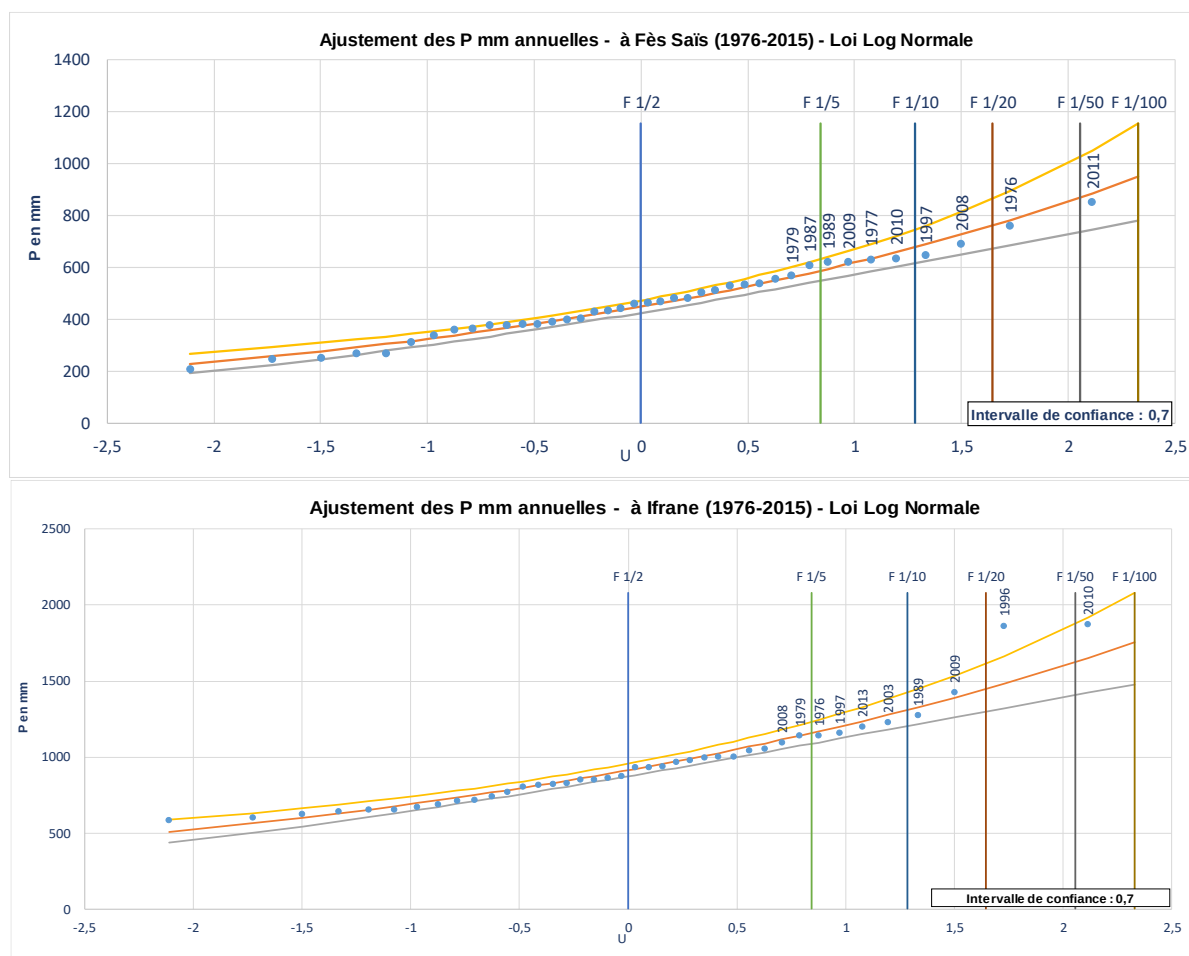
$$F = n - 0.5 / N$$

(**N** = Taille de l'échantillon ; **F** = rang)

Parmi plusieurs lois d'ajustement statistique, la loi Log Normale s'ajuste au mieux avec les données des stations étudiées (Fig. 65). Les résultats obtenus pour les stations représentatives de Fès Saïss (aval) et Ifrane (amont) (1976-2015) sont visualisés sur le tableau 24 ci-dessous.

Pluies annuelles Fès Saïss	F=n-0,5/N	Pluies annuelles Ifrane	F=n-0,5/N
207	0,04	583	0,11
248	0,06	604	0,12
253	0,07	624	0,13
269	0,08	641	0,15
270	0,09	653	0,16
312	0,14	656	0,16
337	0,18	674	0,17
359	0,22	689	0,19
365	0,23	711	0,21
376	0,26	721	0,22
378	0,26	742	0,24
380	0,27	772	0,27
382	0,27	808	0,31
391	0,29	819	0,33
398	0,31	821	0,33
402	0,32	831	0,34
431	0,39	851	0,37
434	0,4	854	0,37
442	0,42	863	0,38
462	0,48	879	0,4

465	0,49	932	0,47
467	0,54	933	0,54
483	0,56	941	0,56
484	0,59	967	0,59
504	0,61	980	0,61
514	0,64	1000	0,64
531	0,66	1002	0,66
534	0,69	1006	0,69
537	0,71	1046	0,71
558	0,74	1056	0,74
569	0,76	1096	0,76
609	0,78	1141	0,78
621	0,81	1144	0,81
622	0,83	1161	0,83
632	0,86	1203	0,86
636	0,88	1233	0,88
647	0,91	1274	0,91
690	0,93	1428	0,93
761	0,96	1866	0,96
853	0,98	1876	0,98

Tableau 24: Les pluies classées et leurs fréquences à station de Fès Saïss et Ifrane (1976/2015)**Figure 65: Ajustement statistique des pluies annuelles des stations de Fès Saïss et Ifrane à la loi Log Normale (1976-2015).**

Le Tableau 25 ci-dessous résume les résultats des fréquences des précipitations annuelles et leurs temps de retour. Une grande disparité est observée entre les probabilités des récurrences sèches et humides, allons de 260 mm à 927 mm comme temps de retour centennal sec et humide dans la station de Fès- Saïss. Pour la station d'Ifrane, la récurrence centennale sèche est estimée à 516 mm, alors que vers l'humide la probabilité centennale peut dépasser 1750 mm.

	Vers le sec						Vers l'humide				
Fréquence	1/100	1/50	1/20	1/10	1/5	1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
Temps de retour	100ans	50ans	20ans	10ans	5ans	2ans	5 ans	10ans ans	20ans ans	50ans ans	100ans
Fès Saïs	260	293	310	358	441	465	621	646	762	864	927
Ifrane	516	505	603	654	710	931	1139	1327	1483	1652	1754

Tableau 25: Précipitations annuelles fréquentielles pour la période (1976-2015), loi Ln-Normale

6. Relations entre les précipitations moyennes annuelles et la topographie

Pour étudier la relation entre les précipitations et la topographie, les 18 stations observées seront analysées. La topographe est l'un des facteurs le plus important par son influence sur la pluviométrie, car il détermine la distribution des pluies. Chow et al., 1988 soulignent que la spatialisation conditionne la structure spatiale des pluies par l'effet orographique du fait de l'ascension des masses d'air humide ou sec, le refroidissement adiabatique induisant la condensation de l'air humide sur les versants au vent. En ce sens, la relation entre les pluies moyennes annuelles et l'altitude des postes et stations pluviométriques est présentée dans la Figure 76 ci-dessous.

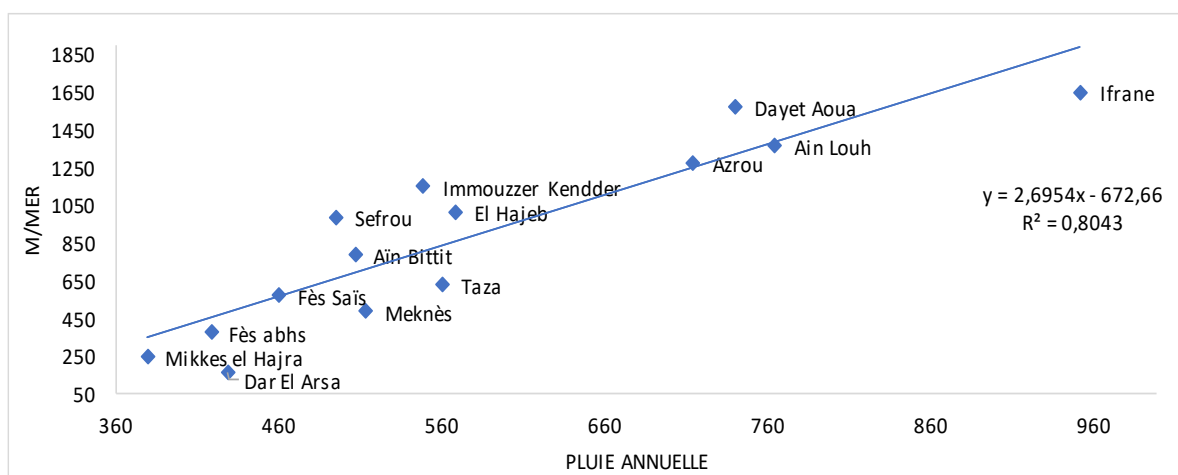


Figure 66: Relations entre les précipitations annuelles et l'altitude (1978-1979/2014-2015).

D'après la figure 66 ci-dessus, on remarque une forte corrélation entre les précipitations moyennes annuelles et les altitudes. Le calcul du coefficient de corrélation entre la pluie et l'altitude donne une valeur de $R^2 = 0.8$ ce qui signifie une très bonne corrélation entre les deux variables altitudinales et pluviométriques (Fig.66).

La valeur modale correspond à une augmentation des précipitations par rapport aux altitudes. En quelque sorte, les stations qui se localisent dans les hautes altitudes sont plus arrosées (Tab. 26). Les stations les moins élevées ne dépassent pas 550 mm comme moyenne de la période 1978-1979/2014-2015.

Station	Altitude	Pluies (mm)
Dar El Arsa	164	429
Mikkès el Hajra	247	379
Fès AHBS	378	419
Meknès	487	513
Fès Saïss	570	460
Azzaba	626	335
Aïn Bittit	790	507
Sefrou	989	495
El Hajeb	1017	569
Imouzzzer Kander	1151	549
Azrou	1275	714
Ain Louh	1365	764
Aït khabach	1474	361
Dayet Aoua	1572	740
Dayet Hachlef	1530	438
Ifrane	1649	953
Boulemane	1901	654
Imouzzzer Kander	1151	549
Tableau 26: Relations entre les précipitations moyennes annuelles (1978-1979/2014-2015) et l'altitude		

Pour bien visualiser la répartition des précipitations et l'influence du relief, un essai de spatialisation est présenté ci-dessous (Fig.67). Comme le cas des pluies saisonnières, la méthode IDW est exploitée pour cet effet, via le SIG ArcGIS®. D'après les résultats obtenus, on souligne que la topographie joue un rôle très important. L'effet de l'orographie est très prononcé dans les bordures moyennes atlasiques. Ce périmètre reçoit une moyenne qui décale entre 600 mm et 950 mm. Par contre, le plateau de Saïss est moins humide et ne dépasse pas 500 mm. On signale également une variation entre la région occidentale et orientale du Moyen Atlas qui s'explique par l'exposition des versants (Fig.67).

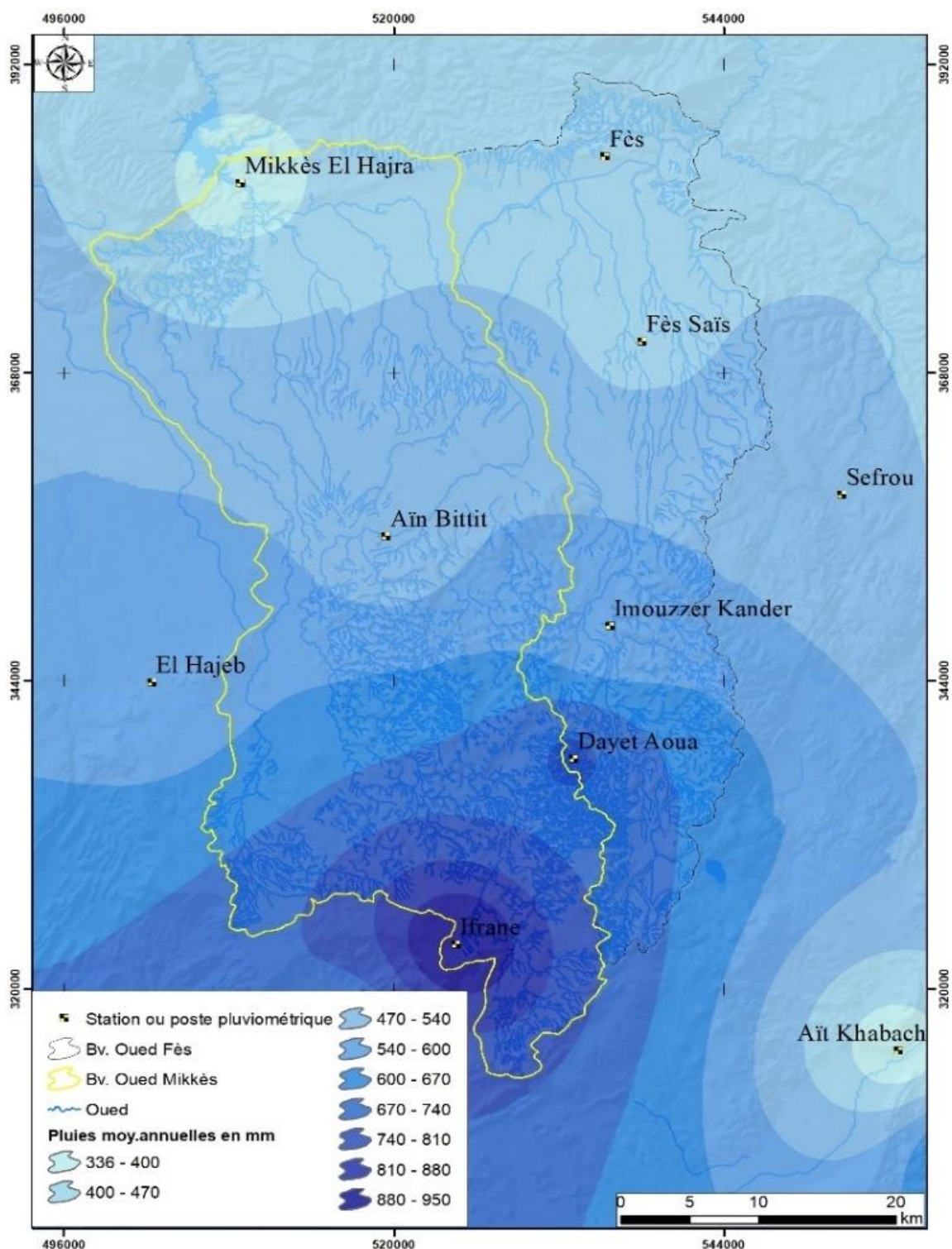


Figure 67: Spatialisation des pluies moyennes annuelles en mm par la méthode d'interpolation. (1978-1979/2014-2015)

7. Le contraste spatiotemporel des températures

La température intervient directement sur le fonctionnement des hydrosystèmes, puisqu'il contrôle plusieurs éléments du cycle d'eau, notamment l'évaporation et l'évapotranspiration. Il est clair que la température est très conditionnée par la topographie, qui marque un grand

contraste entre l'amont et l'aval des deux bassins versants étudiés. Pour bien comprendre le rôle de ce facteur (température), cet axe vise à étudier les variations spatio-temporelles de la température, en se basant sur les données thermométriques de plusieurs stations climatiques disponibles.

7.1 Variation spatio-temporelle des températures moyennes annuelles

À cause de l'orographie, la variation de la température dans la zone d'étude suit la même allure de la répartition spatiale des précipitations. L'analyse de la température est basée sur les données des 7 stations météorologiques, ainsi que les données du modèle climatique « Climat-Model » (www.climat-data.org). Ce modèle a permis de simuler des données de température sur 15 stations localisées dans la zone d'étude (Fig. 68). La comparaison entre les données des stations d'observations climatiques et les données simulées via Climat-Model montre une grande similitude.

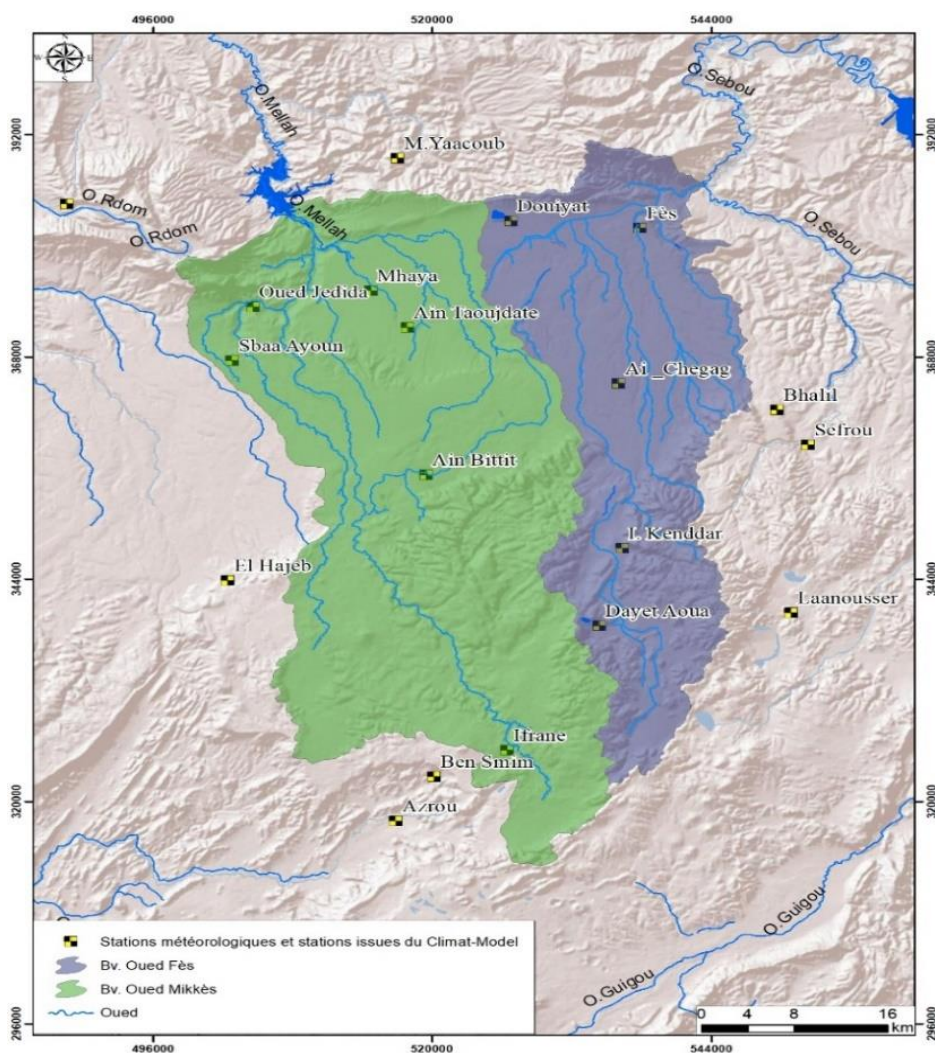


Figure 68: Carte des stations météorologiques et stations issues du Climat-Model

La variation et l'évolution de la température varie d'une station à l'autre. La comparaison entre les stations montre _en effet_ que la température augmente de l'amont vers l'aval (Fig. 69). Pour bien illustrer ce phénomène, un essai de spatialisation des températures moyennes annuelles sera présenté ci-dessous. On note ici, que les stations utilisées pour cet effet, sont les stations du modèle climatique, dont les données présentent 35 ans (1982-2017). Par contre, les données des stations météorologiques recueillies remontent à 1961, mais s'arrêtent malheureusement en 2009.

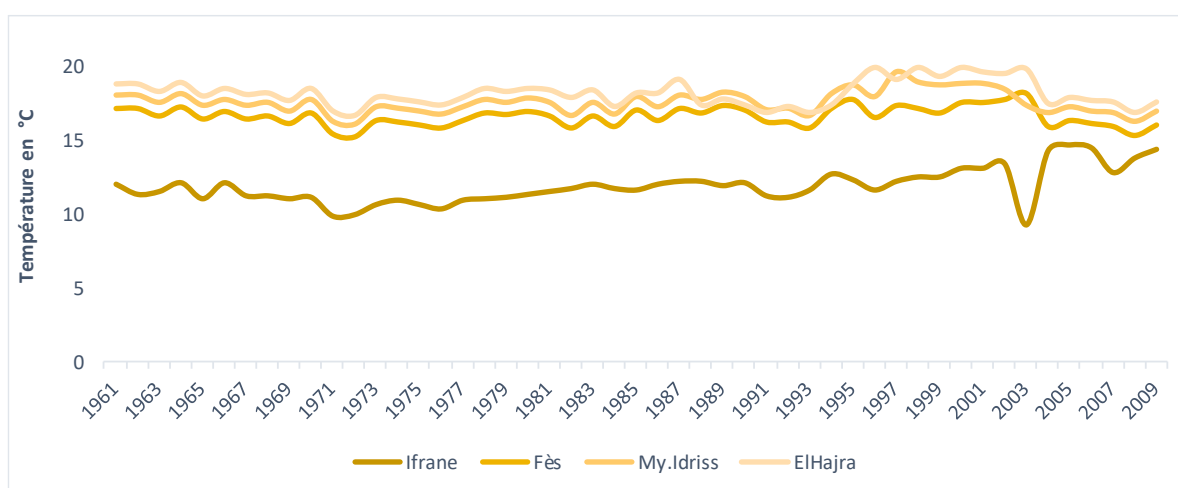


Figure 69: Température interannuelle de la période de 1961-2009

La méthode de spatialisation adoptée est basée sur la méthode géostatistique « Gradient Thermique », via le Système d'Information Géographique ArcGIS®. Les résultats obtenus dans la figure 70 présentent le contraste thermique entre l'amont et l'aval.

Les températures moyennes annuelles de la chronique 1982-2017 marquent une différence de 8°C entre l'amont et l'aval. Les hauts versants ombrés du Moyen Atlas se caractérisent par des températures assez basses (11°C). Tandis que les versants du Prérif sont assez chauds (19°C comme moyenne annuelle). Ce contraste est plus prononcé au niveau des températures maximales et minimales. Pour bien comprendre de l'orographie sur la répartition des températures, un diagramme de corrélation température/altitude, vise à présenter les différentes stations étudiées. Ce diagramme donne un coefficient de corrélation R^2 qui égale 0,98 (Fig. 71). Ce coefficient est près de « 1 », ce qui signifie que la corrélation est très bonne entre les altitudes et les températures.

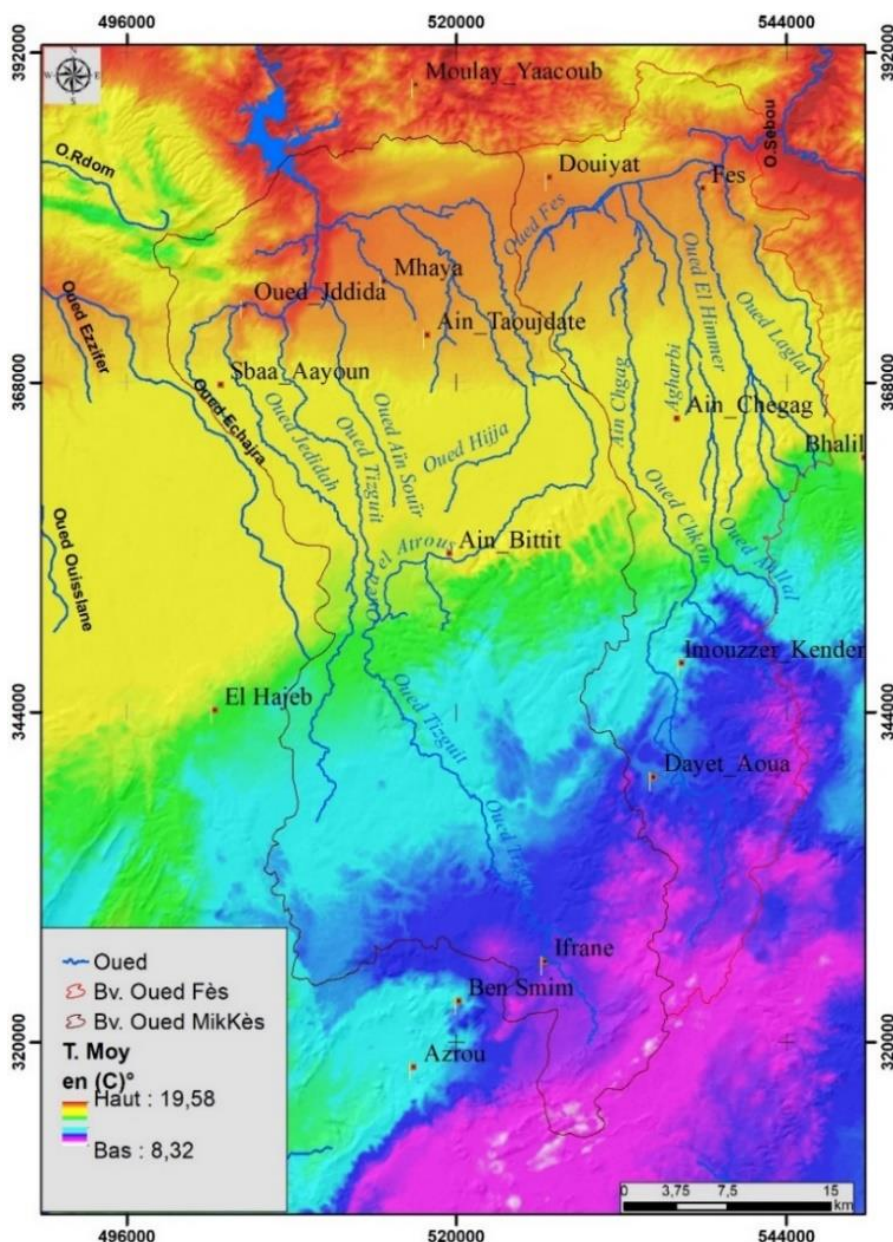


Figure 70: Spatialisation des températures moyennes annuelles en °C par la méthode du Gradient Thermique (1982-2017).

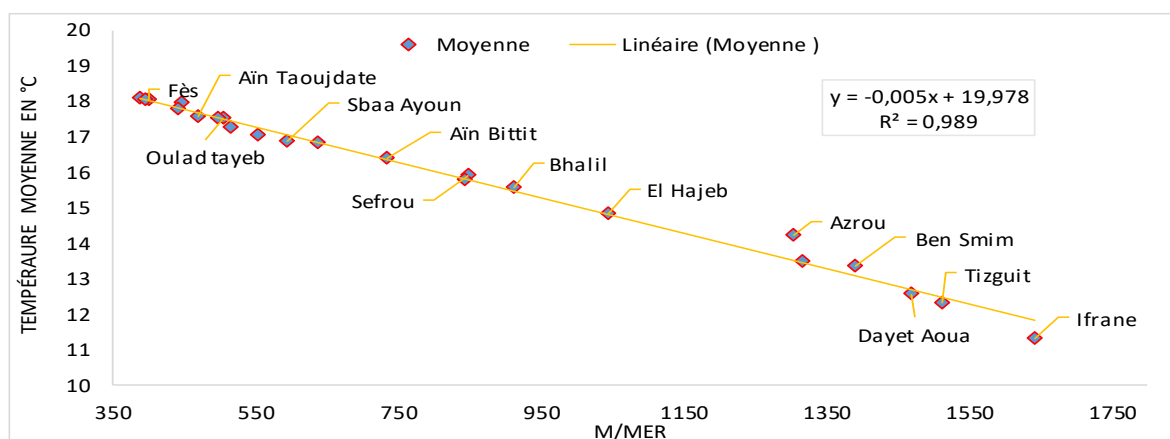


Figure 71: Variation de la température avec l'altitude

7.2 Variation mensuelle et saisonnière de la température

Comme il a été mentionné dans le premier axe de ce chapitre, les mois les plus chauds commencent du juin vers le mois de septembre, par contre les mois les plus froids commencent du décembre vers le mois d'avril (Fig. 72). Le contraste thermique est plus prononcé en hiver. Les valeurs hivernales sont négatives en amont. La station d'Ifrane présente un bon exemple, avec une moyenne hivernale de 4°C. Cette saison connaît des précipitations nivales assez importantes. En descendant vers l'aval, la station de Fès enregistre des valeurs extrêmes assez prononcées. La différence entre l'hiver et l'été dépassé 15°C, avec 26°C comme une moyenne estivale et 11°C comme moyenne hivernale (Fig. 73).

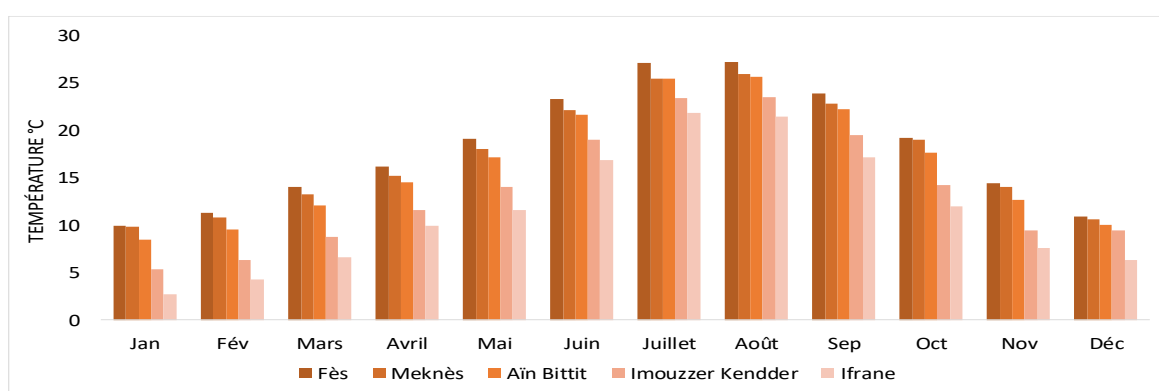


Figure 72: Température moyenne mensuelle pour les stations de Fès, Meknès, Aïn Bittit, Ifrane et Imouzzet Kander

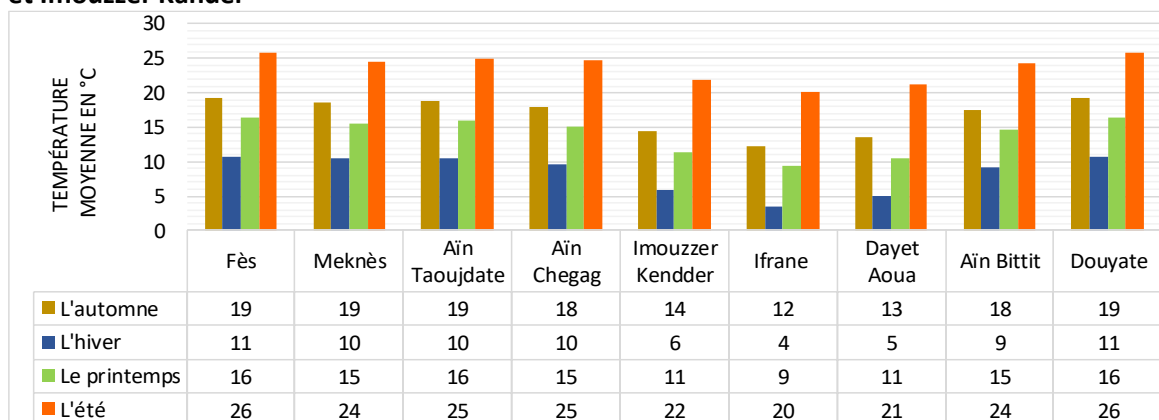


Figure 73: Distribution des températures moyennes saisonnière.

Pour illustrer la distribution spatiale de la température, les figures 74, 75, 76, 77 ci-dessous présentent le contraste des températures moyennes saisonnières. Le cause d'Ifrane représente les moyennes saisonnières les plus basses. Elles varient de 0.4°C comme moyenne hivernale au niveau des points culminants à 8°C au contact avec le dir d'Imouzzet. Par contre, le plateau de Saïs est caractérisé par des moyennes saisonnières un peu moins basses. En été,

les températures au plateau avoisinent 26°C. Elles sont encore plus élevées au niveau des dépressions du Prérif.

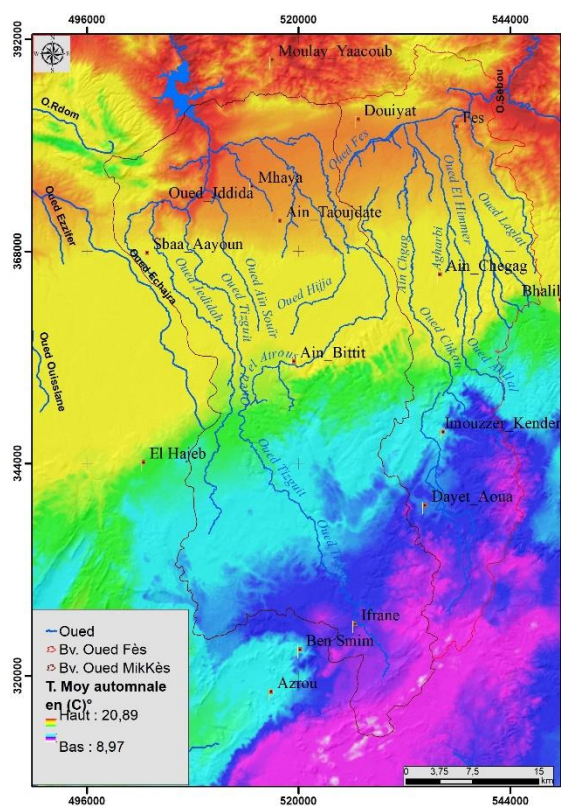


Figure 74: Température moyenne automnale par la méthode du Gradient Thermique

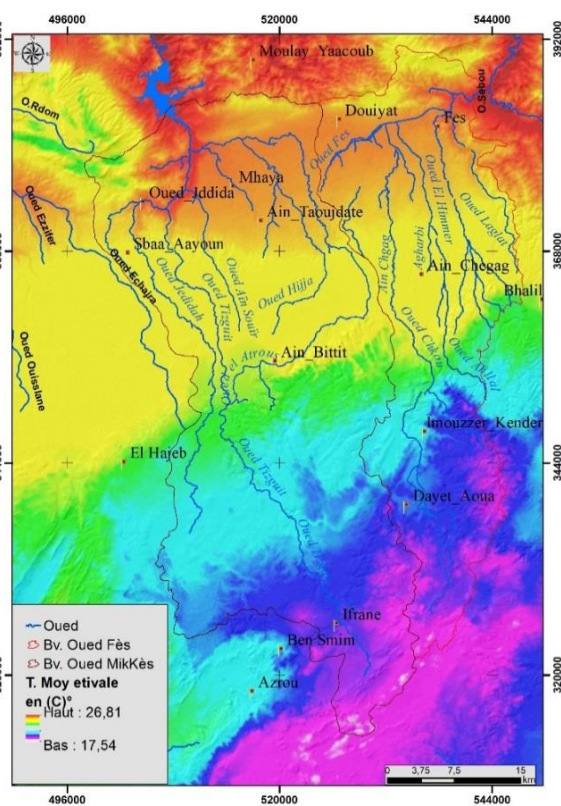


Figure 75: Température moyenne estivale par la méthode du Gradient Thermique

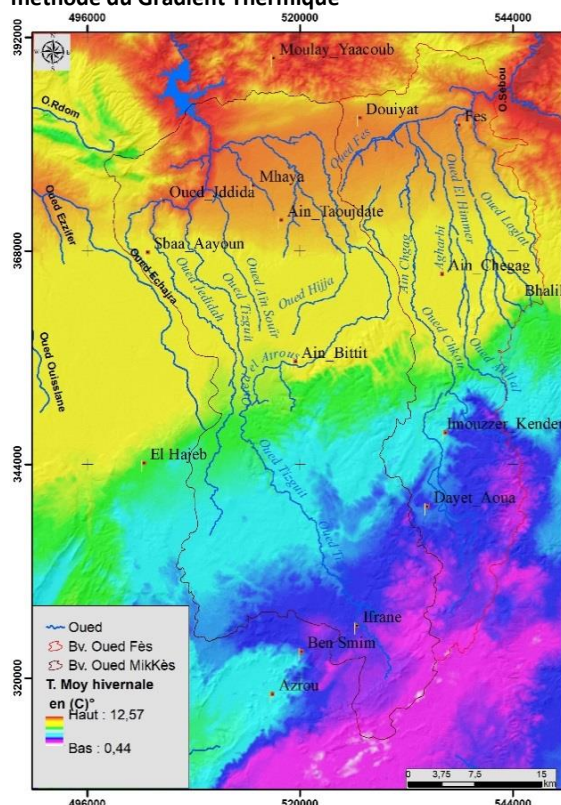


Figure 76: Température moyenne hivernale par la méthode du Gradient Thermique

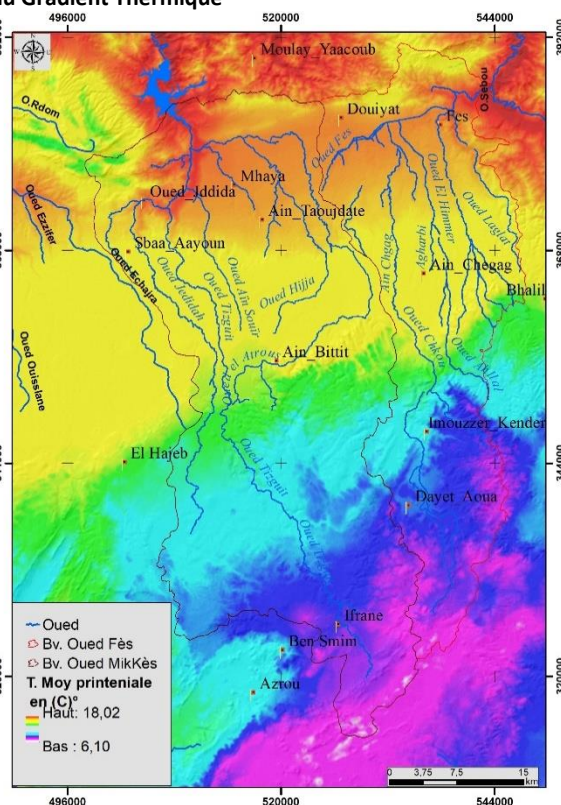


Figure 77: Température moyenne printanière par la méthode du Gradient Thermique

8. Les indices d'aridité dans les deux bassins étudiés

Globalement, les indices d'aridité sont utilisés pour caractériser un climat dans un temps et espace défini. Le calcul de ces indices au même titre que la classification des climats, ont fait l'objet de plusieurs chercheurs dans le domaine de la climatologie. Parmi tous ces indices, les plus utilisés et connus restent ceux de Martonne (1926-1941), Charles Warren Thornthwaite (1948) et Bagoule et Gaussen (1953 à 1957). Les indices de De Martonne et Emberger seront appliqués sur quelques stations implantées dans la zone d'étude, afin d'approcher l'aridité caractérisant la zone d'étude.

8.1 Indice d'aridité de E. De Martonne

L'aridité est un phénomène impliquant une pluviométrie faible (Rognon, 1997). En 1925, Emmanuel de Martonne a proposé une formule climatologique permettant le calcul d'un indice dit indice d'aridité (**IA**). Cet indice est fonction de la température (**T** en °C) et des précipitations (**P** en mm). Il permet de déterminer le type du climat qui caractérise la zone d'étude. Il est fonction de la moyenne annuelle de la température et la hauteur de précipitation annuelle.

L'indice d'aridité annuelle : I

$$I = \frac{P}{(T + 10)}$$

I : indice d'aridité annuelle

P : les précipitations annuelles en mm

T : Température moyennes annuelles en °C.

Si : **I < 5**: Climat Hyper-aride

5 < I < 10: Climat aride

10 < I < 20 : Climat semi - aride

I > 20 : climat humide ou tempéré.

L'indice d'aridité mensuelle : i

$$i = \frac{12p}{(t+10)}$$

i : indice d'aridité mensuel

p : les précipitations mensuelles en mm

t : Température moyennes mensuelles en °C.

Si : **i < 5**: Climat Hyper-aride

5 < i < 10: Mois aride

10 < i < 20 : Mois semi-aride

I > 20 : Mois tempéré.

L'indice d'aridité au niveau de la zone d'étude, vari d'une station à l'autre (Fig.78). D'après la classification de De Marthone, l'indice d'aridité à la station d'Ifrane est le plus souvent supérieur à 20, il a même atteint 85.9 en 1996 (Voir l'annexe 4, période de 1974-1975/2016-2017), ce que signifie que cette zone a un climat humide ou tempéré (**I > 20**). Seules les années 2015 (**IA** = 18.4) et 2017 (**IA** = 14) marquent un indice inférieur à 20.

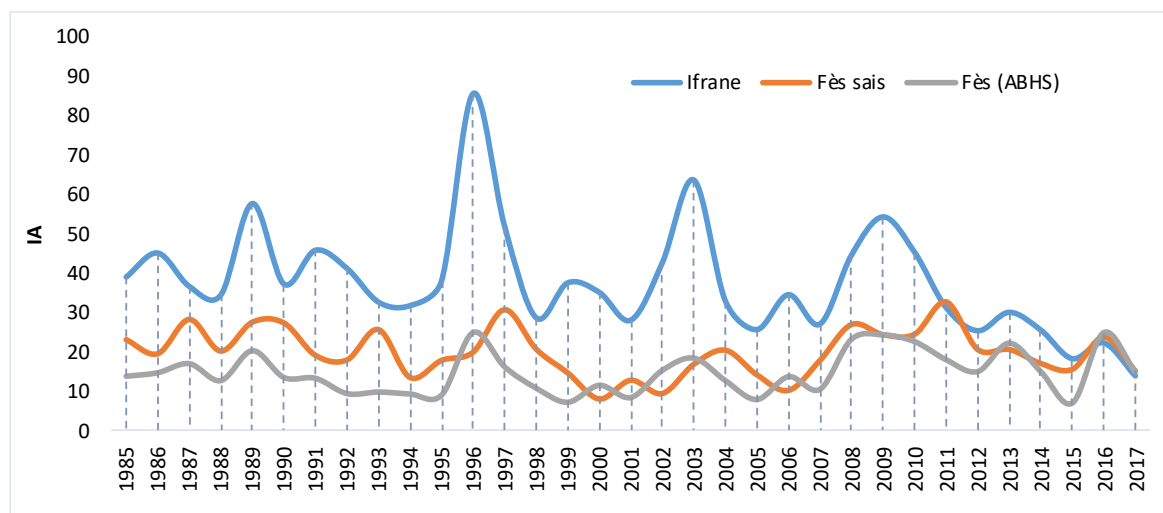


Figure 78: Indice d'aridité des stations de Fès (ABHS), Fès Saïss et Ifrane pour la période de (1985/2017)

En descendant vers le plateau de Saïss, la station de Fès Saïss présente une série qui débute de 1979 jusqu'en 2017. Durant cette chronique, l'indice d'aridité marque une fluctuation entre l'humide et l'aride. En 2011, l'indice d'aridité a été égal à 32.9. Mais en 2000, il n'a pas dépassé 8. En aval, les indices d'aridité les plus bas sont calculé dans la station de Fès ABHS. Le Tableau 27 suivant récapitule le type de climat pour les trois stations durant quelques années marquantes.

	Ifrane		Fès Saïss		Fès ABHS	
Années	IA	Type du climat	IA	Type du climat	IA	Type du climat
1985	39,2	Climat humide	23,2	Climat humide	13,8	Climat semi - aride
1990	37,4	Climat humide	27,5	Climat humide	13,5	Climat semi - aride
2000	35,3	Climat humide	8,0	Climat aride	11,5	Climat semi - aride
2010	45,5	Climat humide	24,6	Climat humide	22,6	Climat humide
2015	18,4	Climat semi - aride	15,6	Climat semi - aride	7,0	Climat aride

Tableau 27: les différents types du climat selon chaque station

Après avoir calculé les indices d'aridité annuels des 3 stations ci-dessus, on se focalise ici à l'indice d'aridité mensuel, en se basant sur le cas de la station d'Ain Taoujdate entre 2008 et 2016. D'après le Tableau 28, les indices d'aridité montrent une très grande variation entre les mois tempérés et les mois arides. Les mois de Juin à septembre sont caractérisés par un climat aride et semi-aride ($5 < i < 10$). Par contre, décembre et janvier sont le plus souvent tempérés à l'exception de l'année 2015-2016.

	Sept	Oct.	Nov.	Déc	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil	Août
2007-2008	3,2	20,2	18,1	10,7	30,2	37,8	9,1	14,2	7,8	0,0	0,0	0,0
2008-2009	17,9	41,8	68,4	69,5	61,2	57,2	41,5	4,4	1,6	5,1	0,0	0,0
2009-2010	23,4	0,9	13,8	62,3	65,9	68,3	55,4	19,3	8,4	10,2	4,3	2,6
2010-2011	0,1	26,1	67,5	32,7	20,9	23,8	19,1	21,1	22,2	20,8	1,1	3,8
2011-2012	2,3	28,1	71,0	34,9	15,7	5,1	5,2	30,7	0,9	0,4	0,1	0,0
2012-2013	7,2	35,3	40,9	30,1	48,6	28,9	78,3	9,9	13,9	0,0	0,0	0,0
2013-2014	15,1	1,9	22,5	18,4	48,2	25,3	7,1	13,0	0,3	0,2	0,0	0,0
2014-2015	0,3	5,2	56,2	26,6	69,9	26,8	27,8	0,2	4,9	0,8	3,2	0,2
2015-2016	7,7	20,3	0,9	0,0	5,2	0,2	21,8	3,4	20,5	0,0	0,0	14,0
Tableau 28: Indice d'aridité mensuelle Ain Taoujdate (2007-2008/2015-2016)												

En conclusion, on peut dire que, d'après De Martonne, les deux bassins versants s'inscrivent dans les climats humides, semi-aride et aride. La station d'Ifrane, par sa situation au Moyen Atlas, se caractérise par un climat humide tout au long de la série étudiée, à l'exception des dernières années sèches. Par contre, les autres stations localisées en aval ont un type de climat est semi-aride à aride.

8.2 Le quotient ombrothermique d'Emberger

L'utilisation du diagramme ombrothermique, appelé aussi diagramme xérothermique de Gaussen, regroupe les précipitations et les températures moyennes dans une station avec une période bien définie. Il a pour objectif de caractériser le type du climat ou bien la saison sèche et la saison humide. Il définit la période humide comme étant celle où les précipitations mensuelles dépassent le double de la température mensuelle, tandis que la période sèche est celle où le double des températures mensuelles dépasse les précipitations mensuelles.

En se basant sur leurs localisations représentatives de l'amont vers l'aval, six diagrammes ombrothermiques d'Emberger ont été réalisés pour les stations d'Ifrane, Imouzzer Kander, Ain Bittit, Ain Taoujdate, Fès Saïs et Meknès (Fig. 79). Ces diagrammes ombrothermiques représente une différence de la saison sèche entre l'amont et l'aval. Pour les stations d'Ifrane et Imouzzer Kander, 8 mois sont humides. Seuls les mois de juin, juillet août et septembre sont secs. Les stations d'Ain Taoujdate et Ain Bittit sont marquées par 5 mois secs, du mois de mai, jusqu'à septembre. En aval, la saison sèche dure 6 mois à Fès et Meknès (mai à octobre).

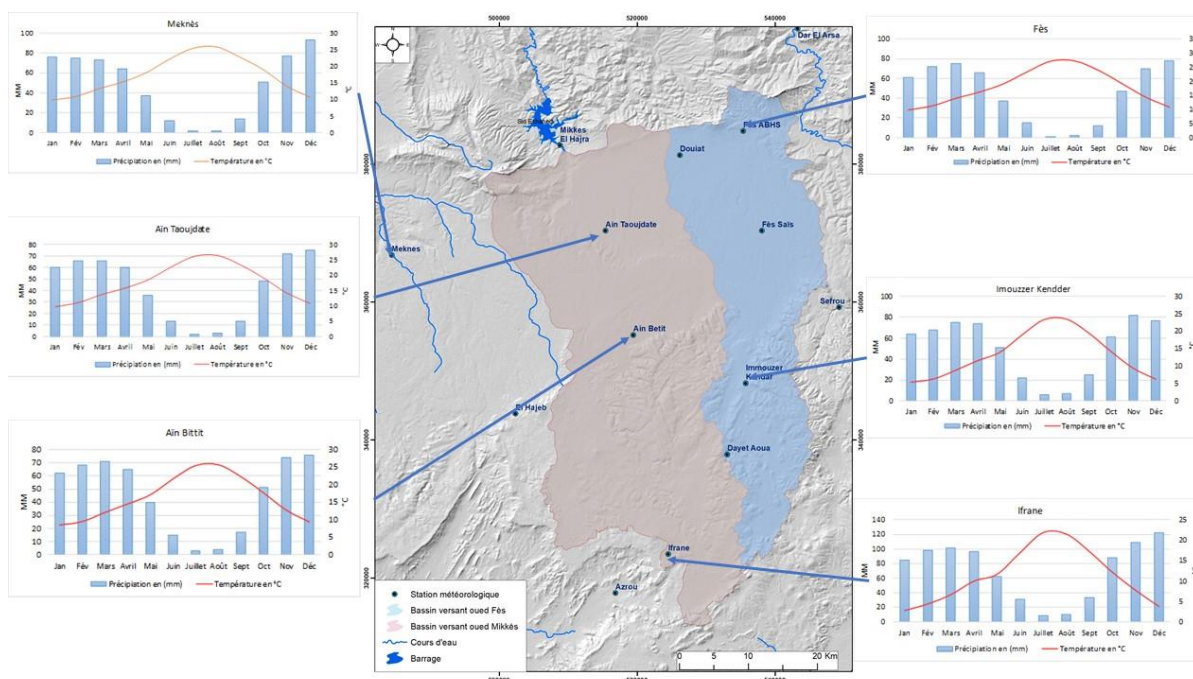


Figure 79: Diagramme ombrothermique des stations Fès, Meknès, Aïn Taoujdate, Aïn Bittit, Ifrane et Imouzzzer Kander.

Généralement, on peut dire que la longueur de la saison sèche diminue de l'aval vers l'amont. Elle dure 6 mois en aval, 5 mois en niveau du dir et seulement 4 mois au Moyen Atlas. Cette disparité des longueurs des saisons sèches est due à la nature du climat semi-aride qui prédomine l'aval par rapport au Moyen Atlas. En effet, le rôle de la continentalité est déterminant au niveau du bilan hydrique dans la zone d'étude. La pluviométrie, la température et l'évapotranspiration conditionnent le rythme saisonnier et la quantité d'eaux dans les deux bassins versants. Cependant, il faut signaler que la relation entre les précipitations et la température ne tient pas en compte la réserve en eau utile dans le sol qui intervient surtout au début de la saison sèche, pour retarder son apparition. (Mounier, 1977 ; Vigneau, 1996 ; Vigneau, 2000).

9. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est une combinaison entre la transpiration et l'évaporation. Elle présente la quantité d'eau transférée du sol vers l'atmosphère. Il faut signaler que l'évapotranspiration réelle (ETR) présente la valeur de ce flux à un instant donné ou de sa moyenne sur une période donnée, pour une station donnée. Lorsque la disponibilité en eau n'est pas limitative, ce flux tend vers une limite appelée évapotranspiration potentielle (ETP) (Garratt, 1984). Ce dernier concept, essentiellement théorique, caractérise une certaine

demande en eau exercée par le milieu. Bien que le terme d'évapotranspiration réelle soit toujours très important dans le bilan en eau, il est souvent traité cavalièrement, sans doute en raison des difficultés liées à son estimation. Il n'est en effet pas possible de le mesurer directement (Itier et al, 1984). L'estimation de l'évapotranspiration potentielle peut être faite par plusieurs formules empiriques, par exemple : Thornthwaite, Turc et Criddle.

9.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) via la méthode de Thornthwaite

Margat en 1997 a défini l'évapotranspiration potentielle comme étant *la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant*. La valeur limite de l'ETP est fonction de l'énergie disponible. Donc, l'évapotranspiration est un indice important dans les bilans hydriques, puisqu'il représente l'évaporation et la transpiration. En fonction de ses processus, la compréhension de l'évapotranspiration mène à comprendre le comportement du régime hydrologique de la zone d'étude. Thornthwaite, 1948 a établi une formule qui se base sur la température moyenne mensuelle. Cette formule s'écrit comme suit :

$$ETP = 16 \times (t / i)^a$$

Avec :

- **ETP** est l'évapotranspiration potentielle mensuelle (mm)
- **T** est la température moyenne mensuelle (°C)
- **I** est l'indice thermique annuel, qui est la somme des douze indices mensuels (**i**) de l'année considérée, avec **i** est déterminé par la formule suivante :

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514}$$

Le coefficient (**a**) est un facteur de correction lié à la latitude (durée max de l'ensoleillement).

$$a = 0.49239 + 1792.10^{-5} \times I - 771.10^{-9} \times I^2 + 675.10^{-9} \times I^3$$

$$a : \text{ sera simplifiée en } a = I (1.6/100) + 0.5$$

$$\text{Donc } i = 0.09T^{3/2}$$

Le Tableau 29 suivant montre la variation de l'évapotranspiration, calculée par la formule de Thornthwaite, en fonction des mois pour la période de 1985-2017, dans les stations d'Ifrane et Fès (Tab.29) (Voir l'annexe 5). Les valeurs minimales de l'ETP pour la station d'Ifrane

est de l'ordre de 10,4 mm en mois de janvier et 16 mm pour la station de Fès dans le même mois. Tandis que les valeurs maximales sont enregistrées en juillet. Elles sont dans l'ordre de 139 mm à Ifrane et 153 mm à Fès (Fig. 80). Cette variation de l'ETP est due au contraste de l'altitude entre l'amont et l'aval, et par conséquent, la différence des températures (Fig. 81).

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avar	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
Ifrane	89,2	51,4	24,7	12,9	10,4	15,8	27,2	40,2	68,6	106,4	143,5	134,6	724,9
Fès	101,4	62,1	31,5	18,7	16	21,8	36,6	50,1	81	120,7	160,4	147,6	847,9

Tableau 29: l'évapotranspiration mensuelle de la période à Fès et Ifrane (1985-1986/ 2016/2017)

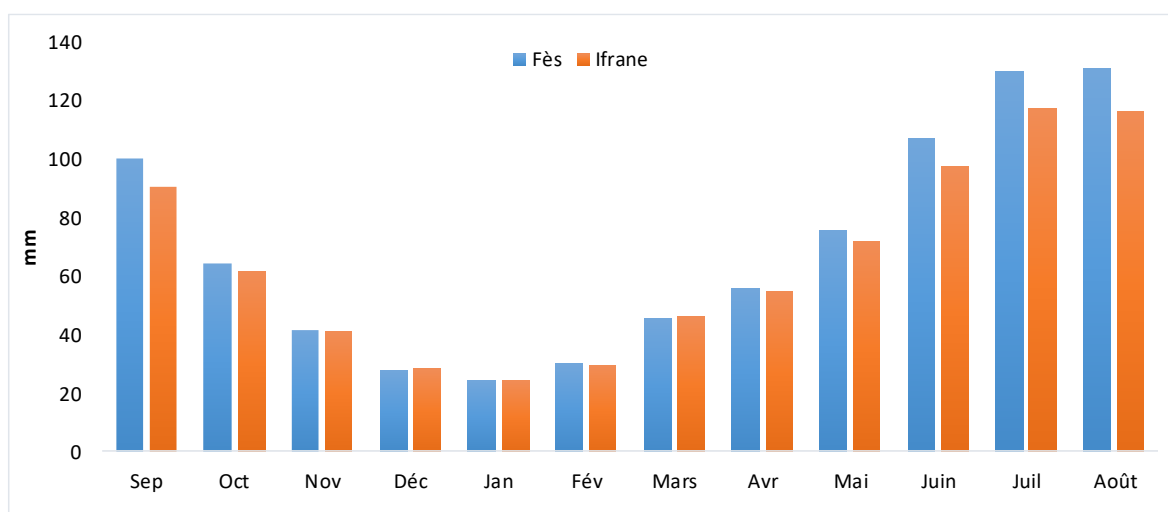


Figure 80: l'évapotranspiration mensuelle de la période (1985-1986/ 2016/2017)

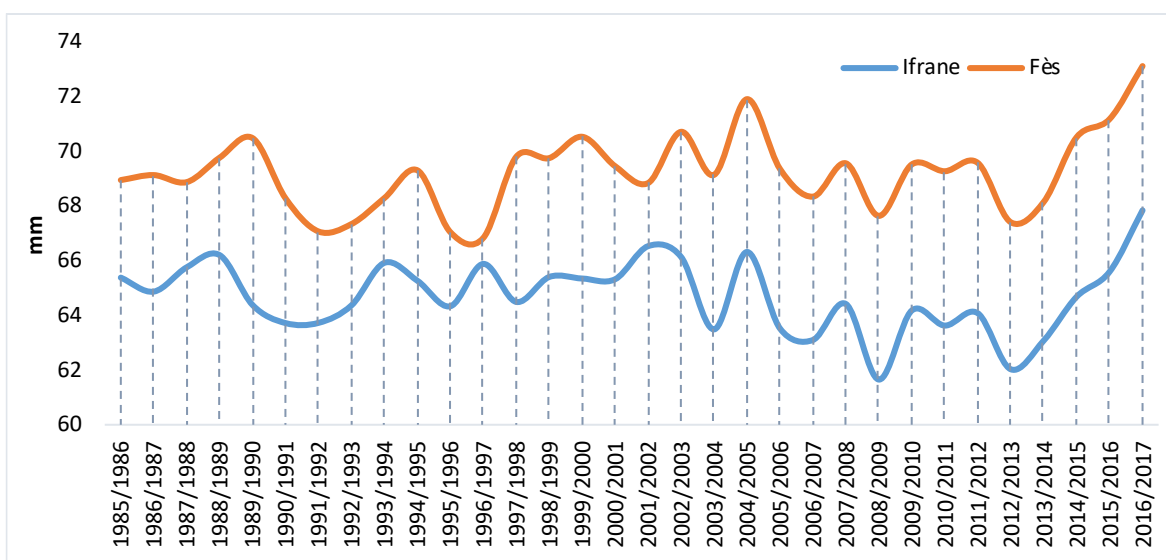


Figure 81: L'évapotranspiration annuelle des stations de Fès et Ifrane (1985-1986/ 2016/2017)

Selon plusieurs chercheurs, le modèle de l'évapotranspiration de Thornthwaite (1948) est devenu rapidement l'un des plus répandus en raison de son efficacité et de sa simplicité. Dans le calcul de l'ETP, il ne nécessite que les températures moyennes mensuelles et la localisation

de la station en latitude. L'autre facteur déterminant est l'énergie (rayonnement) solaire, qui varie en fonction du temps et du lieu (Joncas et al., 1993).

Globalement, les valeurs de l'ETP calculées dans les stations étudiées, montrent que l'altitude présente un facteur déterminant la quantité de l'évapotranspiration 84, 85, 86 et 87 (voir l'annexe 6). D'après les figures 82, 83 ci-dessous, on peut voir une idée résumant la relation entre l'ETP, les précipitations et la température. Cette relation influence directement le bilan hydrique (entre excès et déficit) des deux bassins versants étudiés.

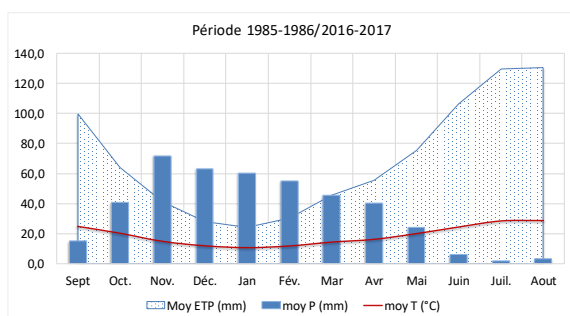


Figure 82: Relation entre l'ETP, précipitation et la température de la station de Fès pour la période de 1978-1979/2016-2017

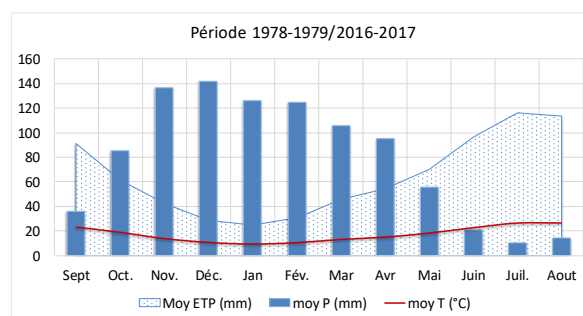


Figure 83: Relation entre l'ETP, précipitation et la température de la station d'Ifrane pour la période de 1978-1979/2016-2017

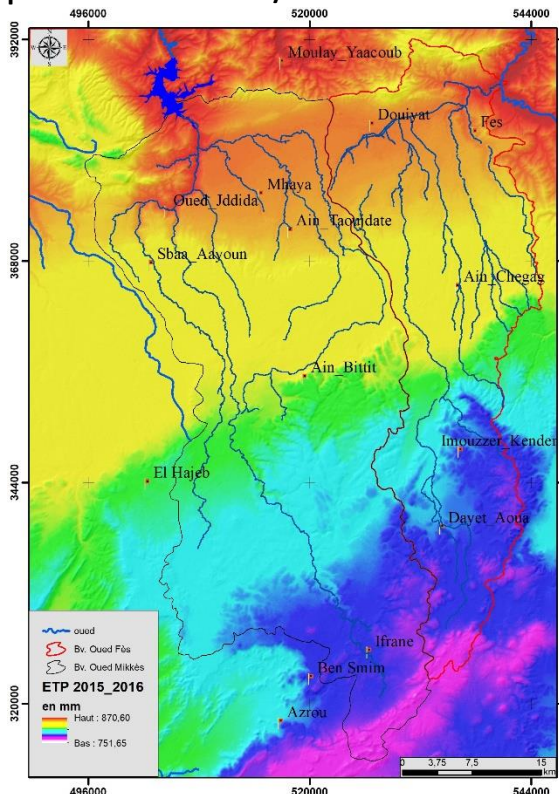


Figure 84: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (2015/2016)

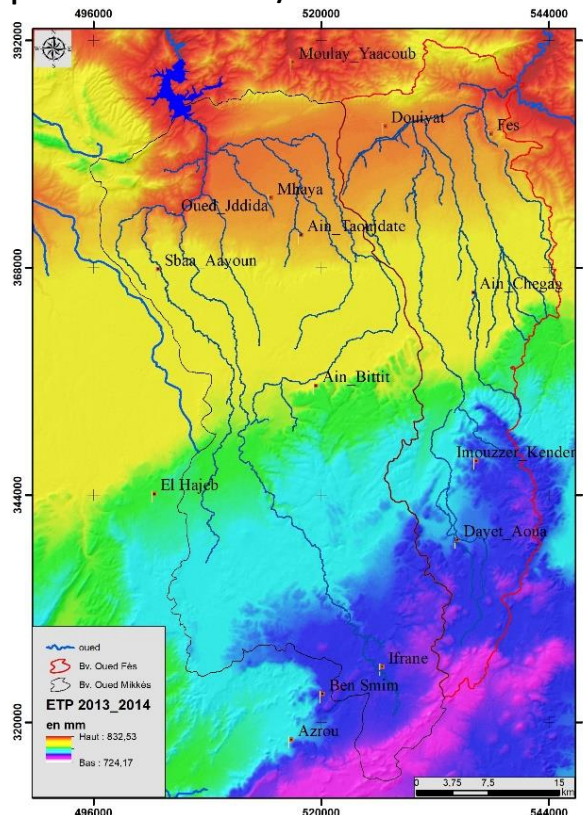


Figure 85: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (2013/2014)

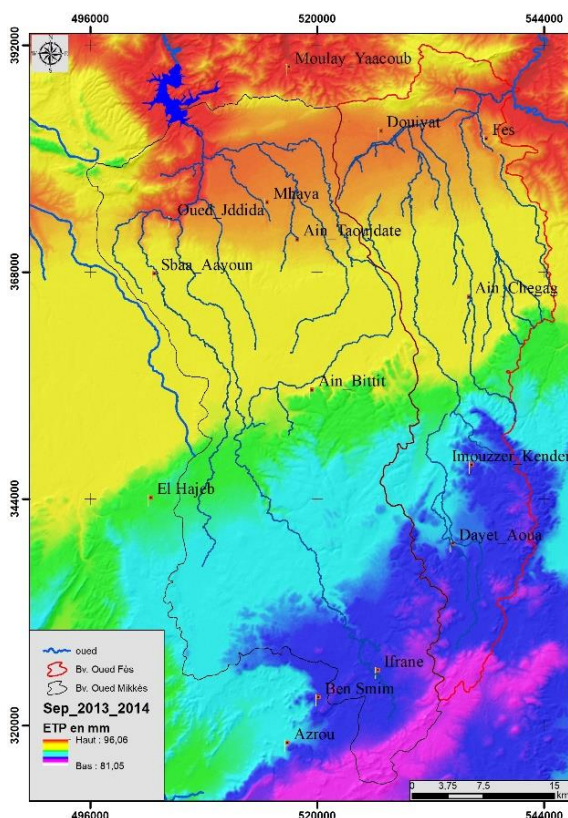


Figure 86: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (Sep. 2013/2014)

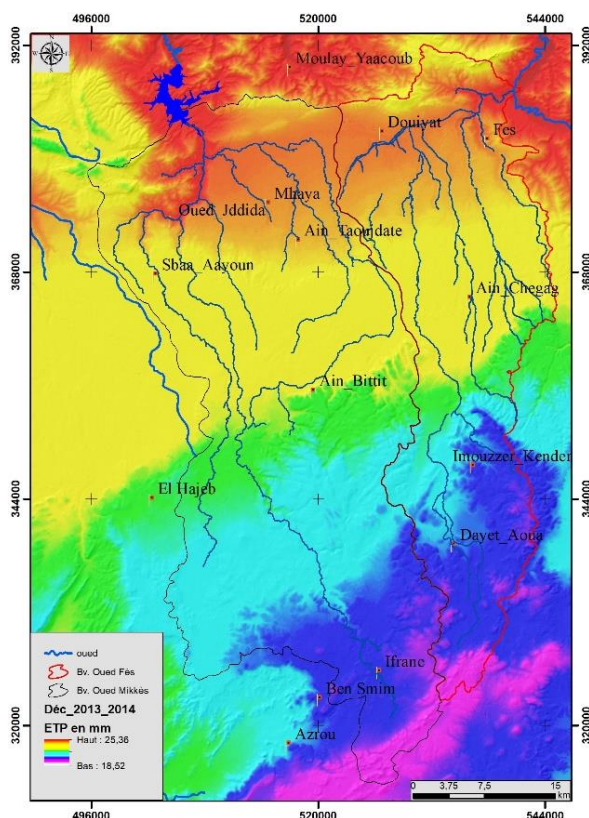


Figure 87: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (Déc. 2013/2014)

9.2 Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) via les méthodes de Thornthwaite et Turc

L'évapotranspiration réelle présente la somme des quantités de vapeur d'eau (en mm) évaporées par le sol et par les plantes quand le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique (Garratt, 1984 ; Lambert, 1996). Diverses formules, basées sur la température et la hauteur des précipitations moyennes annuelles ou mensuelles ont été élaborées pour l'estimation de cette évapotranspiration.

Dans un premier temps, on va essayer de calculer l'ETR par la méthode du bilan de Thornthwaite qui se base sur les valeurs de l'évapotranspiration potentielle (déjà calculée dans les stations de Fès et Ifrane) ainsi que d'autres facteurs tels que : la pluviométrie, la nature du sol, sa saturation en eau... etc. Lambert en 1996, a signalé que cette méthode fait intervenir la notion de la réserve facilement utilisable (RFU), qui correspond à la quantité d'eau stockée dans les premiers mètres du sol, et que les plantes peuvent facilement utiliser par leur tension osmotique sans avoir à freiner l'ETR. La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée entre 0 mm (la RFU vide) et 200 mm (capacité maximale de la RFU). Dans les zones

arides à semi-arides, le sol est considéré saturé quand il absorbe une lame d'eau équivalente à des précipitations de 50mm (Archambault et al, 1975).

Dans ces zones, l'infiltration à la verticale des pluies tombées sur les plaines limoneuses elles-mêmes est nulle ou irrégulier. Thornthwaite a défini ces zones comme celles où l'indice d'humidité est nul ou inférieurs à 10 mm. Dans le plateau Saïss, les valeurs de RFU moyennes sont entre 40 mm et 60 mm et pouvons dépasser 80 mm en périodes de sécheresses aiguës. (Belhassan, 2011).

Selon la méthode Thornthwaite, le calcul de l'ETR se base sur une simple comparaison entre les valeurs de l'ETR et la pluviométrie moyenne mensuelle de la façon suivante :

$$\text{Si } (P + \text{RFU}) > \text{ETP} \quad \text{ETR} = \text{ETP}$$

$$\text{Si } (P + \text{RFU}) < \text{ETP} \quad \text{ETR} = P + \text{RFU}$$

Le Tableau 16 suivant résume les résultats obtenus par la méthode de Thornthwaite pour les stations d'Ifrane et Fès pour la période de 1985-2017. L'ETR atteint 387mm à la station d'Ifrane et 365 à la station de Fès, par conséquent le déficit hydrique (**DH (ETP-ETR)**) égale 312 mm à Ifrane et 479 à Fès. Il est deux fois plus important à Fès qu'à Ifrane, et présente 36 % des précipitations moyennes annuelles (1985-2017). Le surplus hydrique, quant à lui, est très important à Ifrane (587 mm) alors qu'à Fès, il ne dépasse pas 210 mm. (Tab.16).

	Ifrane	Fès
P (mm)	965	575
ETP (mm)	699	844
ETR	387	365
DH (ETP-ETR)	312	479
SH (P-ETR)	578	210
% de SH	60	36

Tableau 30: ETR calculé à Fès et Ifrane (1985-2017)

La deuxième formule utilisée pour calculer l'ETR aux stations de Fès et Ifrane est celle de Turc. Cette formule expérimentale, relative aux bilans hydrologiques, se caractérise par sa simplicité. Elle ne fait appel qu'à la température moyenne et aux précipitations globales des stations. Il s'écrit comme suite :

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

Avec :

ETR : Evapotranspiration réelle annuelle (mm)

P : Précipitation moyenne annuelle (mm)

$$L = 300 + 25T + 0,05T^2$$

T= Température moyenne annuelle (°C) ;

En termes de résultats obtenues, les tableaux 30 et 31 ci-dessous récapitules les ETR moyennes mensuelles des stations de Fès et Ifrane. Les résultats mensuels complets sont dans l'annexe 7. Il est normal que l'ETR varie d'un mois à l'autre puisque la température et les précipitations jouent un rôle primordial dans ses variations. Les valeurs maximales de l'ETR pour la station de Fès sont enregistrées en octobre avec une moyenne mensuelle de 22 mm. Par contre, l'ETR minimale apparait en juillet (2 mm). Pour la station d'Ifrane, les valeurs minimales de l'ETR sont enregistrées en Juillet (9.5 mm) tandis que les maximales correspondent au mois de novembre, avec moyenne mensuelle de 25.5 mm.

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avar	Mai	Juin	Juil.	Aout
P	15	41	71	63	60	55	45	40	24	6	2	3
T	25	20	15	12	10	12	14	16	20	24	29	29
ETP	100	64	41	28	24	30	45	55	75	107	130	131
ETR	11	22	23	19	19	14	20	19	15	5	2	3
DH (ETP-ETR)	88,9	42,0	18,4	8,3	5,4	16,1	25,4	36,8	60,2	101,2	128,0	128,0
SH (P-ETR)	4,2	18,7	48,6	43,9	41,5	41,0	25,4	21,8	8,6	0,6	0,1	0,3

Tableau 31: Résultats des calculs les surplus hydriques moyens mensuels (SH) et les déficits hydriques moyens mensuels (DH) à la station de Fès pour la période de 1985-1986/ 2016-2017

	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avar	Mai	Juin	Juil.	Aout
P	36	85	137	142	126	125	106	95	56	21	10	14
T	23	19	14	11	9	10	13	15	18	22	26	26
ETP	91	62	42	28	25	31	46	55	70	97	116	114
ETR	21	26	25	23	19	21	24	24	24	15	9	13
DH (ETP-ETR)	70	36	17	6	5	9	22	31	46	82	106	101
SH (P-ETR)	15	59	112	119	107	103	81	72	32	6	1	1

Tableau 32: Résultats des calculs les surplus hydriques moyens mensuels (SH) et les déficits hydriques moyens mensuels (DH) à la station d'Ifrane pour la période de 1985-1986/ 2016-2017

D'après les mêmes tableaux 31 et 32 ci-dessus, les bilans hydriques des stations des stations Fès et Ifrane présentent les surplus et les déficits hydriques selon les mois. Dans la station de Fès, les surplus hydriques sont enregistrés dès novembre (48.6 mm) et durent pendant tout l'hiver, avec 43.9 mm en décembre ; 41.5 mm en janvier et 41 mm en février. En ce qui

concerne le déficit hydrique, la station de Fès connaît en été 101.2 mm en juin ; 128 mm en juillet et août (Fig. 88).

Pour la station d'Ifrane, les mois de décembre enregistre le surplus maximal avec 119 mm ; 112 mm en novembre et 107 mm janvier, c'est-à-dire pratiquement le double du surplus hydrique enregistré à Fès (Fig. 88). Pour les déficits hydriques, Ifrane connaît presque les mêmes déficits hydriques calculés en aval des deux bassins versants (Fès). Ces déficits avoisinent 106 mm en juillet et 101 mm en août (Fig. 89).

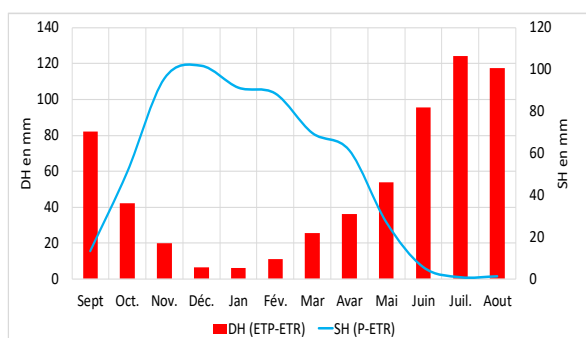


Figure 88: Surplus et déficit hydrique à Fès

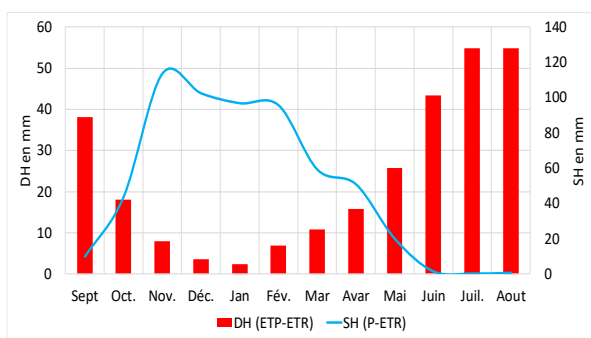


Figure 89: Surplus et déficit hydrique à Ifrane

Pour conclure, les figures 90 et 91 ci-dessous présentent la relation entre l'évapotranspiration réelle et l'évapotranspiration potentielle, avec la température et les précipitations dans les stations de Fès et Ifrane (1985-1986/ 2016-2017). D'après ces figures, on remarque que l'ETP est étroitement lié avec la température, tandis que l'ETR est conditionné par les apports pluviométriques. En effet, dès que les températures baissent l'ETP marque les valeurs minimales dans les deux stations, cela coïncide bien évidemment avec la saison hivernale. Par contre, l'été connaît une augmentation à la fois des températures et de l'ETP. L'ETR quant à lui, connaît ses valeurs minimales pendant l'été, à cause de la sécheresse caractérisant cette saison.

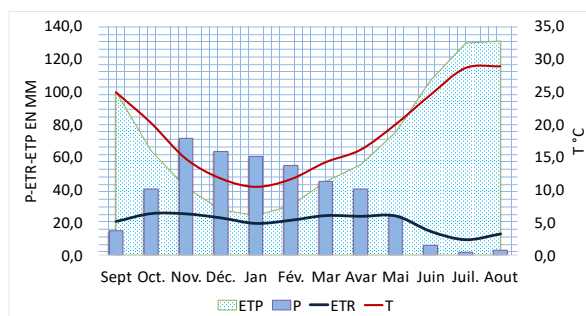


Figure 90: Relation entre ETP et ETR par rapport avec la température et les précipitations à la station de Fès (1985-1986/ 2016-2017).

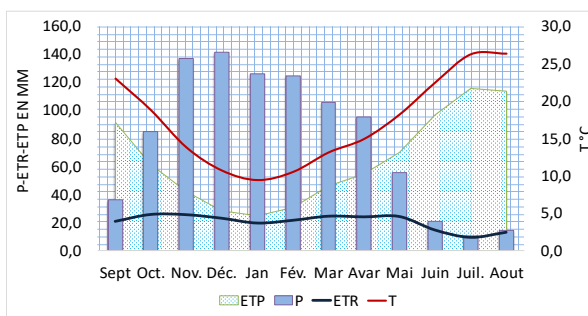


Figure 91: Relation entre ETP et ETR par rapport avec la température et les précipitations à la station d'Ifrane (1985-1986/ 2016-2017).

En conclusion, les méthodes utilisées fournissent une idée sur le bilan hydrique des deux bassins versants étudiés. Ces derniers connaissent un grand déficit en été, en amont comme en aval. Mais ce qu'il faut relever ici, c'est la grande différence entre les surplus en amont et en aval. Comme il a été mentionné ci-dessus, on rappelle que l'amont des bassins étudiés (station d'Ifrane) connaît un surplus hydrique deux fois plus important enregistré en aval (station de Fès). Cette grande différence, influence directement le comportement hydrologique des bassins versants des oueds Fès et Mikkès. Ce phénomène sera étudié dans le prochain chapitre.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Le climat joue un rôle décisif concernant les hydrosystèmes des bassins versants. Dans cette optique, le présent chapitre a mis l'accent sur l'étude des caractéristiques climatiques des bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès, en se basant sur l'analyse d'un réseau assez dense de données météorologiques observées. La critique de ces données a présenté une étape préliminaire et essentielle. Cette opération fastidieuse a permis d'homogénéiser les données et les rendre fiables et crédible, à partir de plusieurs tests et méthodes de critiques des données climatiques.

En termes de résultats obtenus dans ce chapitre, la variation spatio-temporelle des précipitations est une conclusion majeure. L'amont des deux bassins versants est assez humide. Il reçoit le double de la quantité des pluies précipitées en aval. Au niveau interannuel, la quantité des précipitations diffère d'une année à l'autre. Cependant, on a pu dégager plusieurs tendances humides et sèches durant un siècle d'observations pluviométriques. À l'échelle intra-annuelle, les précipitations se concentrent bien évidemment en hiver et au printemps. Cependant, les autres saisons reçoivent parfois de grande quantité d'eau, soit à cause des orages estivaux, soit à partir des perturbations atmosphériques automnales.

Les méthodes géostatistiques nous ont permis de spatialiser ces précipitations au niveau des deux bassins, afin de bien illustrer le contraste pluviométrique entre l'amont et l'aval. Ce contraste est bien plus clair en ce qui concerne les températures. En effet, l'altitude joue un rôle déterminant concernant la répartition des températures au niveau des deux bassins versants. À partir de la méthode du *Gradient Thermique* on a pu illustrer ce contraste thermique allant jusqu'à 10°C entre l'amont et l'aval. Ces situations pluviométriques et

thermiques vont intervenir pour contrôler le bilan hydrique de différentes zones des deux bassins versants. Ce volet de l'étude a été approché à partir de l'étude de l'évapotranspiration. Pour cet effet, on s'est basé sur les méthodes de Thornthwaite et Turc, afin d'estimer l'ETP et l'ETR dans stations météorologiques représentatives des deux bassins. Les résultats obtenus montrent que l'évapotranspiration est beaucoup plus importante en aval par rapport à l'amont. En été, toutes les zones des bassins versants connaissent un grand déficit hydrique. Mais en hiver, l'amont connaît un surplus hydrique deux fois plus important enregistré en aval. Alors, comment cette situation va-t-elle influencer l'hydrosystème des deux bassins versants ? Est-ce que ça veut dire que le rendement hydrologique sera beaucoup plus important en amont par rapport à l'aval ? Ou bien les autres facteurs physiographiques vont-ils basculer la donne ? La réponse à ces questions fera l'objet des prochains chapitres.

CHAPITRE III : QUANTIFICATION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE : METHODES ET TECHNIQUES DE MESURES ET SPATIALISATION

Sommaire

1. QUELLE APPROCHE POUR COMPRENDRE L'HYDROLOGIE DE SURFACE DES DEUX BASSINS ETUDIES?
2. METHODES ET TYPES DE MESURES DES DEBITS
3. METHODE DE JAUGEAGE ADOPTEE : EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES
4. PROCEDE DE L'ACQUISITION DES DONNEES HYDROMETRIQUES VIA LA METHODE
5. DELIMITATION ET CODIFICATION DES POINTS DE MESURES DANS LES DEUX BASSINS ETUDIES
6. QUANTIFICATION DES ECOULEMENTS DE SURFACE DANS LES BASSINS VERSANTS ETUDIES
7. L'ETUDE DE LA VARIATION SPATIOTEMPORELLE DES ECOULEMENTS DE L'AMONT VERS L'AVAL
8. SPATIALISATION DES RENDEMENTS HYDROLOGIQUES : CARTOGRAPHIE DES DEBITS SPECIFIQUE

INTRODUCTION DU CHAPITRE

L'appréciation des ressources en eau de surface est une étape indispensable afin de bien gérer cette ressource vitale. C'est une étape indispensable, puisqu'elle présente un outil primordial au niveau de la gestion des ressources hydriques, à partir de la connaissance de leur situation qui contribue d'une façon directe ou indirecte aux processus de prise de décision (Despax et al., 2017 ; Mishra, 2010 ; Boiten, 2000 ; Aldegheri, 1979). En ce sens, le présent chapitre vise à quantifier les écoulements de surface dans les deux bassins versant de l'oued Fès et l'oued Mikkès. Pour cette ambition, plusieurs axes seront liés au contexte méthodologique de l'hydrométrie opérationnelle. Car, les méthodes de mesures hydrométriques sur terrain sont très diverses et demandent une bonne maîtrise des techniques de jaugeages et un bon savoir-faire concernant l'analyse des données hydrométriques.

Après une introduction méthodologique et une brève présentation des techniques de mesures des données hydrométriques, les axes de ce chapitre seront focalisés sur l'approche adoptée afin de mesurer les débits ponctuels et les critères du choix des points de mesures. Les campagnes de jaugeages ont été réalisées durant 3 ans (2015, 2016 et 2017), en différentes situations hydrologiques (étiages et hautes eaux).

Les résultats de mesures obtenus seront exploités sur deux niveaux. D'abord, une analyse détaillée de l'évolution cumulative des débits des cours d'eau drainant les deux bassins de l'amont jusqu'en aval, en se basant sur les « profils hydrologiques ». Dans un deuxième temps, le dernier axe vise à spatialiser les ressources en eau de surface à l'aide d'un Système d'Information Géographique (**SIG**). Cette spatialisation se base sur le rendement hydrologique des différentes parties de l'aire d'étude, via la cartographie des « débits spécifiques ».

1. Quelle approche pour comprendre l'hydrologie de surface des deux bassins étudiés ?

L'hydrologie est une science de la terre qui s'intéresse au cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol. Les nouvelles approches hydrologiques sont toutes focalisées sur les méthodes de l'hydrologie quantitative. Cette dernière vise à comprendre le fonctionnement hydrologique ; à mesurer les débits ; à

expliquer les phénomènes et à simuler les comportements hydrologiques. (Roche et al, 2012). Toutes ces finalités sont étroitement liées aux données hydrométriques.

L'hydrométrie est à la fois une discipline et une méthode permettant de produire les données nécessaires pour toutes études hydrologiques. Le concept de l'hydrométrie provient des racines grecques : "hydro" = *eau* et "métrie" = mesure. Selon Larousse, *l'hydrométrie est une science qui a pour objet de mesurer les propriétés physiques de l'eau et spécialement le débit des eaux superficielles et souterraines*. En effet, l'hydrométrie est une discipline qui étudie les débits des cours d'eau, en mesurons leurs largeurs, hauteurs et vitesses des flux, que ce soient naturelles ou artificielles (Perret et al., 2017).

Dans les zones semi arides, la plupart des oueds sont peu jaugés et se caractérisent par un régime hydrologie complexe, à cause de la rareté et/ou la soudaineté des précipitations, ce qui engendre un écoulement irrégulier et très influencé par plusieurs facteurs physique et anthropiques. C'est pour cela, la connaissance des débits des différentes situations hydrologiques est une étape primordiale. En effet, l'acquisition des données hydrométriques permet, non pas seulement de comprendre les caractéristiques des hydrosystèmes, mais également de prévoir et gérer les situations hydrologies normales ou extrêmes (périodes d'étiages et hautes eaux).

Pour comprendre le comportement hydrologique des bassins versants de l'oued Fès et Mikkès, plusieurs études ont été menées sur ce domaine (Amraoui, 2005 ; Lasri, 2015), mais aucune d'entre elles n'a été basée sur des mesures hydrologiques (jaugeage) à l'exception des mesures périodiques de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou (ABHS), visant essentiellement les grandes sources localisées dans le Saïss et ses bordures Moyen Atlasique. À cet égard, pour répondre à la question de cet axe, cette étude sera basée sur plusieurs compagnes de jaugeage des oueds et des sources localisés dans les deux bassins versant de l'oued Fès et Mikkès, et ce, durant les différentes situations hydrologiques (haute eaux et bases eaux) entre 2014 et 2017. Les deux prochains axes seront focalisés sur la présentation des approches méthodologiques visant la quantification des écoulements de surface via les techniques de jaugeage.

2. Méthodes et types de mesures des débits

Comme il a été mentionné plus haut, l'exploitation de l'hydrométrie opérationnelle permet de produire des données indispensables pour toutes études hydrologiques. Plusieurs difficultés contraignent cette opération. Les méthodes de mesure des données hydrométriques sur terrain très diversifiées, mais elles sont toutes destinées à calculer les volumes d'eau qui passent à travers d'une section par une unité de temps bien défini (Obda, 2004).

Dans cet axe, on va présenter les techniques de mesures de débits les plus couramment utilisées dans l'acquisition des données hydrométriques. L'acquisition de ces données hydrométriques dépend sur plusieurs types et méthode de jaugeage. Ce dernier est défini par Musy (2014) comme étant *l'ensemble des opérations destinées à mesurer le débit d'un cours d'eau, pour produire des données hydrométriques*. Ces méthodes varient selon les types des données que voulons obtenir, ainsi que son adaptation avec chaque régime des cours d'eau.

À cet égard, nous allons présenter chaque type de jaugeage et ses caractéristiques par rapport aux autres méthodes de mesure des débits. Bien qu'il se repose sur des innovations technologiques récentes, le principe de ces techniques remonte à l'une des premières techniques de jaugeage au flotteur développée par Léonard De Vinci (De Vinci, 1904), l'un de ses méthodes de mesure la plus usée qualifie la réalisation d'une courbe de tarage (Hersch, 1993 ; WMO, 2010).

L'utilisation de ces méthodes doit s'adapter à plusieurs conditions, à savoir le type d'écoulement, la fréquence d'utilisation, l'accessibilité, les types des données que l'on souhaite obtenir, la disponibilité de matériel ainsi que le temps. Dans les prochains paragraphes, trois méthodes de mesures de débits seront présentées :

- Les méthodes globales : dans lesquelles le débit (Q) est mesuré d'une façon directe. Exemple : méthode volumétrique, seuils jaugeurs, dilution chimique, électromagnétisme.
- Les méthodes complètes : dans lesquelles les trois composantes la hauteur, la largeur et le temps sont mesurées indépendamment. Exemple : moulinet hydrométrique.
- Les méthodes incomplètes : dépendent sur le champ des vitesses est exploré de façon partielle. Exemple : méthode ultrasonique, bateau mobile et flotteurs.

2.1 Les méthodes globales

Le jaugeage par les méthodes globales est conditionné par l'adaptation aux types des écoulements. Les méthodes du jaugeage volumétrique, seuils jaugeurs, dilution chimique et le jaugeage électromagnétique sont présentées ci-dessous.

2.1.1 Méthode volumétrique (capacitive)

La méthode volumétrique se caractérise généralement par sa capacité de mesurer directement le débit à partir d'un temps nécessaire pour remplir d'eau dans un récipient d'une contenance déterminée. Le matériel requis est simple : un récipient calibré et un chronomètre. Cette méthode est simple, peu coûteuse et rapide. Cette méthode n'est que rarement applicable dans les mesures des débits, il se pratique généralement que pour les faibles débits des oueds et sources (Photos : 33 et 34).



Photo 33: jaugeage capacitif aux sources Aïn Chkef. (27 Juin 2014)



Photo 34: Jaugeage capacitif dans la source d'Aïn Smen. (27 Juin 2014)

2.1.2 Seuils-jaugeurs

Cette méthode consiste à capter l'écoulement d'une section de contrôle artificielle, permette d'obtenir un régime d'écoulement stable. Il s'agit de ramasser l'écoulement de l'eau dans son lit naturel pour forcer l'eau à se déverser en chute libre (déversoir en paroi mince) d'une section de contrôle de dimensions bien défini (Photo : 35, 36). L'installation de ses seuils dépend du régime des écoulements, ils peuvent aussi d'être installés de manière permanente ou temporaire.



Photo 35: Déversoir à paroi mince, source Ribaa Amont. (29 fév. 2016).



Photo 36: Déversoir à paroi mince, source Ain Sultane. (12 Avril. 2015).

2.1.3 Dilution chimique

Le jaugeage par la dilution est l'un des méthodes volumétriques de mesure des débits. Il se fonde sur le principe de la conservation de masse. Cette méthode consiste généralement à injecter dans le cours d'eau connu (**Q**) un corps en solution (**C1**), et à suivre l'évolution de sa concentration (**C2**) au cours du temps (Fig. 92). Il repose sur la comparaison de la concentration connue du traceur injecté en un point (Photo. 37) (sel, fluorescéine, bicarbonate de sodium) à partir des hypothèses suivantes :

- ✓ (**q**) le débit du cours d'eau est constant (régime permanent et non influencé),
- ✓ Le débit **q** du traceur à la section de prélèvement est égal à celui de l'injection (pas de pertes), et négligeable devant **Q**,
- ✓ Le mélange est homogène à la section de prélèvement.

$$Q = q \times \frac{C_1}{C_2}$$

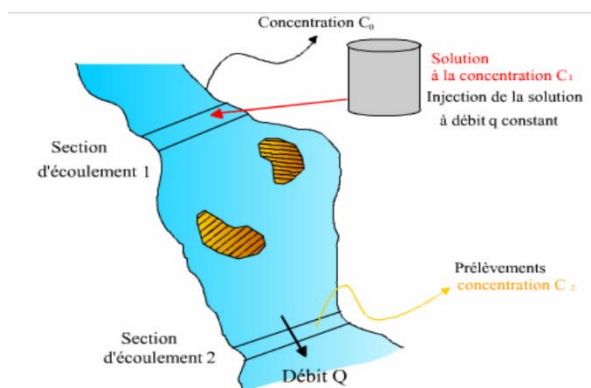


Figure 92: Principe du jaugeage par dilution



Photo 37: Jaugeage par dilution. (Https://www.iowater.org/)

La méthode de jaugeage par dilution chimique est bien adaptée dans les mesures des débits avec un écoulement torrentiel, car la pente assure le brassage et un bon mélange du traceur. Cette méthode est rarement appliquée dans les mesures des débits, car la procédure prend beaucoup de temps pour une demande des autorisations délivrées par les autorités.

2.1.4 Méthode électromagnétique

Cette méthode de mesure des débits est basée sur le principe de FARADAY sur l'induction électromagnétique. Elle se base sur le principe que tout conducteur en mouvement dans un champ magnétique est traversé par un courant électrique. Le sens du courant induit dépend du sens de déplacement du conducteur et son intensité est proportionnelle à la vitesse de déplacement et à l'intensité du flux magnétique. En appliquant ce principe, les mesures des débits en se basant à la loi de FARADAY. Il s'écrit comme suite :

$$U = E / HI \text{ Avec :}$$

- ✓ **U** = vitesse moyenne d'écoulement dans la section (en **m/s**)
- ✓ **E** = énergie induite (en **volts**)
- ✓ **H** = intensité du champ magnétique (en Teslas)
- ✓ **I** = largeur ou distance entre les électrodes (en **m**).

En 1974, les hydrologues anglais, M.J Green et R.W. Hershy, ont eu l'idée d'appliquer le principe de FARADAY aux écoulements très lents et aux biefs envahis par la végétation dans lesquels les méthodes classiques sont inutilisables.

2.2 Méthode Ultrasonique

Le principe de la méthode ultrasonique consiste à mesurer la vitesse moyenne de l'écoulement dans un plan horizontal du chenal à partir d'un émetteur récepteur d'ultra-sons, fixé à la verticale du plan d'eau. Le temps de parcours aller-retour entre l'appareil et le plan d'eau permet de déterminer la distance **x** et par déduction la hauteur d'eau **H** puisque l'on connaît la position nécessairement fixe de l'appareil. Ce type de limnigraphe nécessite la présence d'un pont stable ou la mise en place d'un portique (Photo. 38).

Une station hydrométrique ultrasonique est constituée :

- D'une ou plusieurs paires de transducteurs installés de part et d'autre de l'écoulement et mis en place de façon permanente pour la détermination de la vitesse ;
- D'un capteur de niveau et d'une échelle limnimétrique de référence pour la détermination de la section mouillée ;
- D'un ensemble électronique avec microprocesseur pour la gestion des transducteurs, le calcul de la vitesse et du débit.



Photo 38: Station de mesure ultrasonique à Ain Bittit (25 mai 2016).

2.3 Méthodes complètes

Les mesures de débits par les méthodes complètes seront présentées à partir des jaugeages par l'ADCP et par le moulinet hydrométrique.

2.3.1 Jaugeage par ADCP

L'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) est l'un des nouvelles méthodes utilisées dans les mesures des débits. Le profileur de courant ADCP reste la solution préférée pour effectuer des mesures de débit des cours d'eau de grands ou moyens débits (Photo. 39). Cette technique a gagné une popularité dans des situations pratiques (Lee, K et al.2014).

Le principe de mesure de débit par cet équipement utilise la variation de fréquence entre le signal émis et le signal renvoyé par les particules en suspension des écoulements, afin calculer la vitesse des écoulements et leur direction (Fig. 93). Cette technique est plus complexe à maîtriser que les techniques conventionnelles d'exploration des vitesses (moulinets, courantomètres électromagnétiques, etc.).



Photo 39: Mesure de débit par l'ADCP.
(<https://www.adcpro.fr/>)

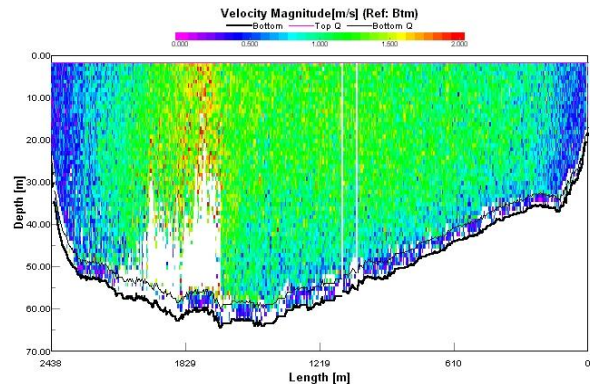


Figure 93: Jaugeage ADCP ; profil en travers, et distribution des vitesses dans la section Rio Amazonas à Obidos, Brésil, 16/12/2003.
(<http://www.ore-hybam.org>)

2.3.2 Moulinet hydrométrique

Le jaugeage par un Moulinet hydrométrique reste la méthode la plus appliquée dans les mesures des vitesses par exploration du champ des vitesses d'un écoulement dans une section bien choisie. Le moulinet hydrométrique permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale.

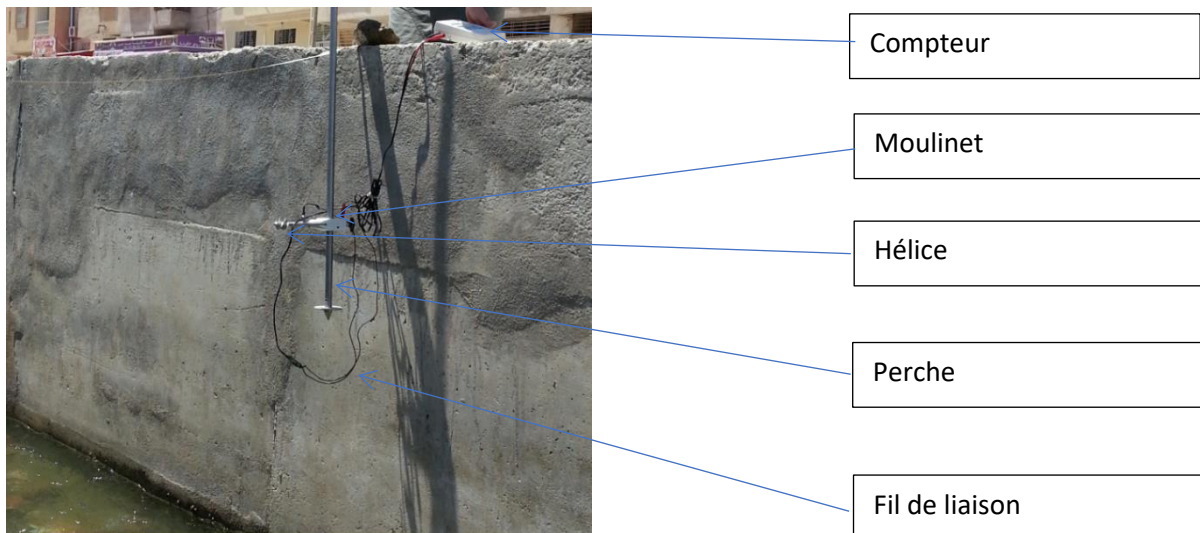


Photo 40: Moulinet utilisé pour mesurer de débit

Les principaux éléments du matériel sont :

- **Perche** : est un support gradué que l'on fixe le moulinet avec son hélice

- **Compteur** : le compteur a pour objet de totaliser les impulsions électriques émises par le moulinet.
- **Moulinet** : Peut être monté sur une perche rigide ou sur un lest profilé appelé Saumon. Le moulinet a le rôle de transformer le mouvement de rotation de l'hélice en impulsions électriques aisément transférables et enregistrables dans le compteur. Le principe en est simple ; un axe auquel est fixée l'hélice est entraîné dans son mouvement de rotation. L'axe du moulinet est porté par des paliers de haute précision à très faible frottement.
- **Hélice** : Les hélices sont réalisées le plus souvent en alliage léger, quand il s'introduit l'écoulement, la vitesse longitudinale de l'eau va provoquer la rotation de l'hélice. La relation entre la vitesse de rotation (**n**) (en tours/seconde) et la vitesse de l'eau (**V**) (en m/s) ne dépend que du pas (**p**) de l'hélice :

$$V = np$$

L'étalonnage des hélices se fait dans des laboratoires simulant les conditions réelles d'emploi.

Dans notre étude, toutes campagnes de jaugeage sur les principaux cours d'eau ont été réalisées à l'aide d'un moulinet hydrométrique. Le choix de la taille de l'hélice dépend de la vitesse des courants. Une présentation détaillée du protocole de jaugeage qu'on a suivi, fait l'objet du prochain axe.

3. Méthode de jaugeage adoptée : Exploration du champ des vitesses

Après avoir présenté quelques méthodes de mesure des débits, cet axe sera focalisé sur la présentation de la méthode adoptée dans l'acquisition des données hydrométriques des oueds drainant les bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès. Il s'agit de la méthode « Exploration du champ des vitesses ». Cette dernière consiste à intégrer spatialement les profondeurs du cours d'eau et les vitesses sur des points distribués horizontalement et verticalement à travers une section en travers (Aldegheri, 1979 ; Herschy, 1993 ; Obda, 2004 ; Le Coz, 2014 ; Despax, 2017). La méthode d'exploration du champ des vitesses est bien adaptée pour mesurer les débits des petits cours d'eau, tels ceux de la zone d'étude.

Le principe de cette méthode consiste donc à calculer le débit d'une façon indirect à partir de la détermination du champ des vitesses dans une section mouillée transversale du cours

d'eau. Elle se base sur un certain nombre de points dans une verticale bien réparti dans la largeur de la section choisi (Fig. 94 et 95). Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur. Le débit qui s'écoule dans une section d'écoulement ($S\text{m}^2$) peut être défini à partir de la vitesse moyenne v (m/s) perpendiculaire à cette section.

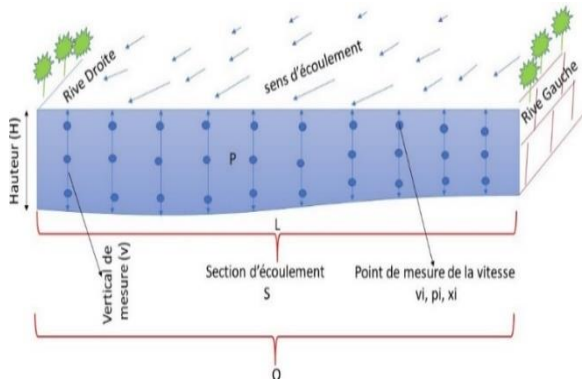


Figure 94 : Débit et champ des vitesses à travers une section.

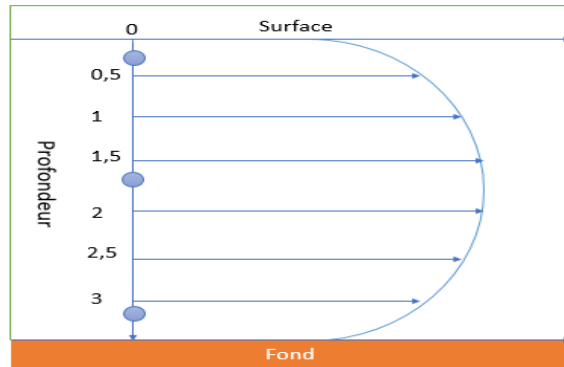


Figure 95: une verticale dans une section de jaugeage.

Le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section (S) de longueur (L) se fait par intégration des vitesses (V_i) définies en chacun points de la section de profondeur (p_i) (variant pour chaque verticale de 0 à une profondeur maximale (P)) et d'abscisse (x_i) (variant pour chaque verticale de 0 à L) soit l'expression suivante :

$$Q = \iint_S v \cdot dS = \int_0^P \int_0^x v_i \cdot dx$$

L'exploration du champ des vitesses nécessite un moulinet, une perche, et un courantomètre. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, il faut faire au moins trois mesures suivant la profondeur d'une verticale. La vitesse d'écoulement est mesurée en chaque verticale à partir de la vitesse de relation de l'hélice située à l'avant du moulinet par un nombre de tours (N) dans une unité de temps (T). La fonction $v = f(N)$ est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet), suivant le mode opératoire adoptée pour le jaugeage.

4. Procédé de l'acquisition des données hydrométriques via la méthode « Exploration du champ des vitesses »

L'acquisition de nos données hydrométriques sera menée en quatre étapes :

1. Préparation de la feuille de jaugeage et opérations de terrain ;
2. Choix de la section de jaugeage ;
3. Mesure et exploration du champ des vitesses dans un point ;
4. Dépouillement des jaugeages.

4.1 Préparation de la feuille de jaugeage et opérations de terrain

Avant le lancement de mesure des débits sur terrain, une préparation préalable d'une feuille de jaugeage est fortement recommandée, avant le lancement l'opération de dépouillement. La feuille de jaugeage reflète toute la réalité dans la section de mesure et comporte plusieurs éléments indispensables (Voir l'annexe 8). Elle comporte toutes les données liées à la situation de la section de jaugeage (nom du bassin et de l'oued, l'emplacement de la section superficie du bassin, heure de la mesure, code hydrologique, situation administrative, les coordonnées du point de mesure...), ainsi que le cadre lié au type de matériel utilisée dans la mesure comme l'équipe de jaugeage, type de moulinet, numéro des hélices et leurs diamètres. Les données les plus importantes dans la feuille de jaugeage présentent le cadre du dépouillement des mesures. Ce dernier se compose du numéro de l'abscisse (**m**), le numéro de la verticale (**m**), la profondeur (**m**), le nombre de contacts et le temps (**t**). En fin, un cadre supplémentaire est destiné au type de la section, type des berges, nature du fond du lit, rugosité et type d'écoulement.

4.2 Choix de la section de jaugeage

Il faut rappeler que le but des mesures de débit par exploration du champ des vitesses a déterminé les hauteurs d'eau, la largeur du cours d'eau et la vitesse des flux dans une section de jaugeage, afin de calculer le débit. Ceci est bien évidemment conditionné par le choix de la section de mesure de débit. Les critères qu'on a suivis lors du choix de la section de jaugeage sont présentés dans les points suivants :

- L'accessibilité et la facilité des déplacements du matériel ;
- La régularité de la section et l'absence de blocs, fosses et végétations ;

- La régularité des lignes de courant ;
- Les sections doivent être rectilignes, homogènes tout en évitant les zones de stagnation ou de retour d'eau. Dans le cas de vitesses d'écoulement très faibles, tel le cas de l'oued Fès amont, le choix des sections est très délicat et nécessite une correction de la section (balayage de la section) ;
- Et en fin, la possibilité de mesure toujours au même endroit durant les périodes d'étiages et des hautes eaux.

Le choix de la section de jaugeage dépend aussi du type, du style et de la nature d'écoulement, est-ce qu'il est naturel ou artificiel ? Car, la distribution des écoulements varie entre les deux sections artificielles et celles naturelles. Si les mesures se font dans une section de mesure naturelle, les vitesses sont distribuées d'une façon très différente dans toute la section de mesure, ce qui exigé de faire plusieurs verticales. Par contre, une section artificielle canalise les vitesses et les rend homogène dans toute la section, de ce fait, il est possible de démunie le nombre des abscisses de la section mesuré en prenons en considération la largeur de la section.

Pour faciliter la lecture de ce chapitre, nous étions obligés d'utiliser plusieurs abréviations lors de la rédaction (Tab. 35). Les notations et les unités usées sont présentées dans le tableau suivant.

Indice	Unité	Description
A	[m2]	Aire de la section mouillée.
C	[m3=m3]	Concentration
D et h	[m]	Profondeur d'eau et hauteur
Boul.	[m]	Largeur au miroir de la section
Pm	[m]	Périmètre mouillé
P U ou q	[m2=s]	Profil ou débit unitaire
Q	[m3=s]	Débit liquide
Rh	[m]	Rayon hydraulique = A=Pm
U	[m=s]	Vitesse débitante = Q=A
v	[m=s]	Vitesse locale
V	[m=s]	Vitesse moyenne ou linéaire
x	Axe latéral de la section	
y	Axe vertical de la section	
z	Axe longitudinal, dans la direction de l'écoulement	

Tableau 33: Abréviation des indices utilisés dans le manuscrit

4.3 Mesure et exploration du champ des vitesses dans un site

Après avoir choisi la section de jaugeage selon les critères mentionnés ci-dessus, il faut deviser la section sur plusieurs abscisses selon la largeur de la section (Fig. 96). Le nombre des verticales à choisir dépend de la largeur de la section.

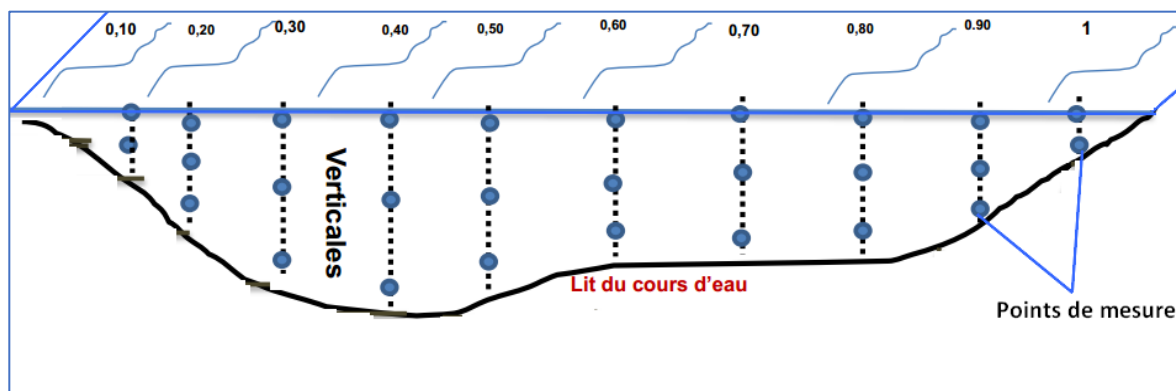


Figure 96: Exemple d'un site de mesure dans une section de jaugeage

Lors des mesures, il faut tenir le moulinet au point choisi sur la première verticale d'une rive à l'autre, avec l'alignement sur direction du courant avant le commencement du comptage (Photos. 41, 42, 43, 44, 45 et 46). On mesure la vitesse en un ou plusieurs points sur chaque verticale, en comptant le nombre de tours du moulinet entre 30 secondes au moins et en plus en cas de vitesses faibles. Comme on l'a déjà mentionné, sur chaque verticale, il faut mesurer la vitesse au moins en 3 points, du fond du cours d'eau (proche du fond) jusqu'à sa surface, tout en gardons l'hélice complètement submergée. La section d'écoulement peut être évaluée en relevant la profondeur d'eau en diverses verticales réparties régulièrement sur toute la largeur.



Photo 41: Exploration du champ des vitesses dans une section naturelle, source Ribaa aval. (29 fév., 2016)



Photo 42: Exploration du champ des vitesses dans une section canalisée, source de Bittit. (12 avril. 2015)



Photo 43: Exploration du champ des vitesses, source Ghara. (25 fév. 2018)



Photo 44: Exploration du champ des vitesses, Source Ribaa. (12 avril 2015)



Photo 45: Exploration du champ des vitesses dans l'amont de l'oued Fès. (12 Sept. 2014)



Photo 46: Exploration du champ des vitesses dans l'amont de l'oued Fès. (5 sep. 2014)

4.4 Dépouillement des jaugeages

Après avoir obtenue les vitesses de chaque verticale de la section, la largeur et la profondeur de chaque verticale dans la feuille de jaugeage. La dernière étape consiste à dépouiller les feuilles de jaugeages. Pour cet effet, nous nous sommes appuyés sur le logiciel DEPJAU© (BRGM) (Fig. 97). Ce dernier permet de saisir les données de jaugeage afin de calculer le débit d'écoulement déduit des mesures de vitesses réalisées sur la section jaugeée.

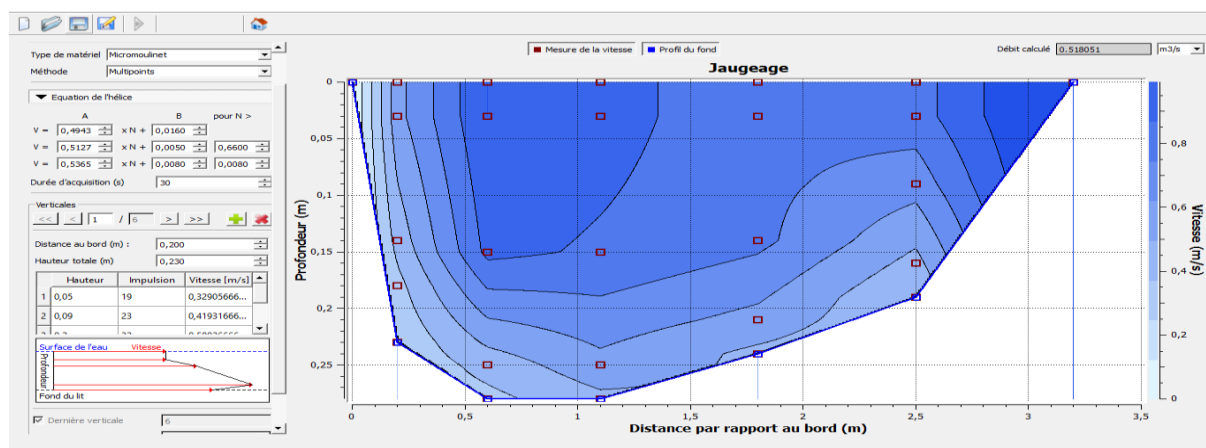


Figure 97: Interface du logiciel DEPJAU

Les résultats obtenus lors du traitement des données de jaugeage dans le logiciel permettent d'obtenir les débits écoulés dans le point de jaugeage (Tab. 33), ainsi que d'autres paramètres récapitulés dans le tableau suivant (Tab.33).

	Unité	Valeur
Largeur	(m)	2.1
Profondeur moy	(m)	0.163
Profondeur max	(m)	0.21
Rayon hydraulique	(m)	0.153
Coefficient	KI1/2	0.522
Vitesse moy de surface	(m/s)	0.0849
Vitesse max	(m/s)	0.365
Rapport Vmoy/Vmoys	(m/s)	1.76
Vitesse moy	(m/s)	0.15
Section mouillée	(m ²)	0.343
Débit	m³/s	0.0512
Tableau 34: dépouillement d'un point de jaugeage de la source de Bergama El Kbira		

5. Délimitation et codification des sites de mesures dans les deux bassins étudiés

Comme il a été signalé dans ce chapitre, la délimitation des sous-bassins et la détermination des points de mesure présente une étape primordiale. Le choix des points de mesure prend en considération tous les facteurs qui peuvent influencer la démarche de ce travail présentée dans le précédent axe. On rappelle que l'accessibilité pour les points de jaugeage, l'influence de la lithologie, les apports des affluents ainsi que les pertes causées par les prélèvements sont tous les critères pris en considération pour choisir les points de jaugeages.

Après la détermination des points de jaugeage et la délimitation des sous bassins, la codification de chaque point de jaugeage présente une étape primordiale. Pour cet effet, les codes sont constitués des chiffres des lettres tirés des initiales de l'oued et de ses affluents, suivi par une numérotation croissant de l'amont jusqu'à l'exutoire de chaque sous bassin versant. Par exemple :

- **(OCh1)** = **(O)** : = oued ; **(Ch)** = Chkou ; **(1)** = premier point jaugé à partir de l'amont du bassin versant de l'oued Chkou ;
- **(Oti2)** = **(O)** = oued ; **(Ti)** = Tizguit ; **(2)** = deuxième point jaugé à partir de l'amont du bassin versant de l'oued Tizguit.

Le tableau suivant récapitule les points de jaugeages choisis sur les différents oueds drainant les deux bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès (Tab. 34).

Id	Bassin	Sous Bassins	X	Y	Code hydro	Sup (km²)
1	Oued Mikkès	Oued Sbaa Ayoun	502359	366642	OSb1	9
2		Oued Souir	513084	365954	OSo1	40
3		Oued Mikkès	505789	372816	OMi1	97
4		Oued N'Ja	520532	366447	ONj1	139
5		Oued Aïn Taoujdate	515190	370424	OAt1	54
6		Oued N'Ja	519793	381043	ONj2	64
7		Oued Mikkès	507702	378894	OMi2	59
8		Oued Jdidda	512200	336747	OJd1	170
9		Oued Jdidda	508117	361802	OJd3	53
10		Oued Akkous	511663	353389	OJd2	9
11		Ribaa et Aïn Atrous	516033	350657	ORi1	7
12		Oued Bittit	518933	355201	OBi1	6
13		Oued Tizguit	514261	356546	OTi4	17
14		Oued Tizguit	515103	357537	OTi5	35
15		Oued Atchane	526318	359858	OAt1	222
16		Oued Ageumgeum	525639	341391	OAg1	147
17		Oued Atrous	521480	347826	OAg2	26
18		Oued Tizguit	530687	318800	OTi1	56
19		Oued Tizguit	529051	325036	OTi2	75
20		Oued Tizguit	521997	337853	OTi3	227
21	Oued Fès	Oued Fès	528145	377181	OF1	109
22		Oued Aïn Chkef	532486	380668	OCh5	3
23		Oued Aïn Smen	532571	375880	Och4	16
24		Oued Aïn Chkef	534907	374228	OAc1	2
25		Oued Aïn Chkef	534473	377609	OAc2	6
26		Oued El Himmer	538002	366321	OHi1	81
27		Oued Boufkrane	541872	378903	OB2	24
28		Oued Boufkrane	544573	370401	OB1	25
29		Oued Malleh	535954	388141	OM1	34
30		Oued El Mehratz	541720	366289	OEm1	124
31		Oued El Mehratz	537972	380266	OEm2	13
32		Oued Fès	537442	384972	OF2	42
33		Oued Chkou	538068	327652	OCh1	47
34		Oued Ain Sultane	536541	347404	OAS1	1
35		Oued Chkou	538822	338807	OCh2	157
36		Oued Chkou	535970	356769	OCh3	193

Tableau 35: les points codés et jaugés pour les oueds de Fès et Mikkès avec leurs superficies

Le nombre de points jaugés est dans l'ordre de 36 points. Durant toute la période des travaux de terrain, 6 campagnes de jaugeages ont été réalisées entre 2014 et 2017. 3 campagnes en périodes d'étiage lors des mois de septembre 2014, 2015 et 2016, et 3 autres campagnes durant les hautes eaux en avril 2015, 2016 et 2017. Heureusement, toutes ces

compagnes ont été réalisé dans des conditions météorologiques convenables. Car, toutes les mesures des débits doivent être non influencées par l'apport des précipitations.

Pour le bassins versants de l'oued Fès : 15 site de jaugeage ont été choisis. Les superficies des sous bassins varient entre 193km² pour le point de l'oued Chkou (OCh3) et 1 km² pour le bassin de la source d'Aïn Sultane (OAS1). Le bassin versant de l'oued Mikkès, quant à lui, recèle 20 points de jaugeage. Les sous bassin le plus réduit d'Aïn Bittit (OBi1) d'couvre 6 km², tandis que le bassin de l'oued Tizguit (OTi3) totalise 227 km² (Fig. 98).

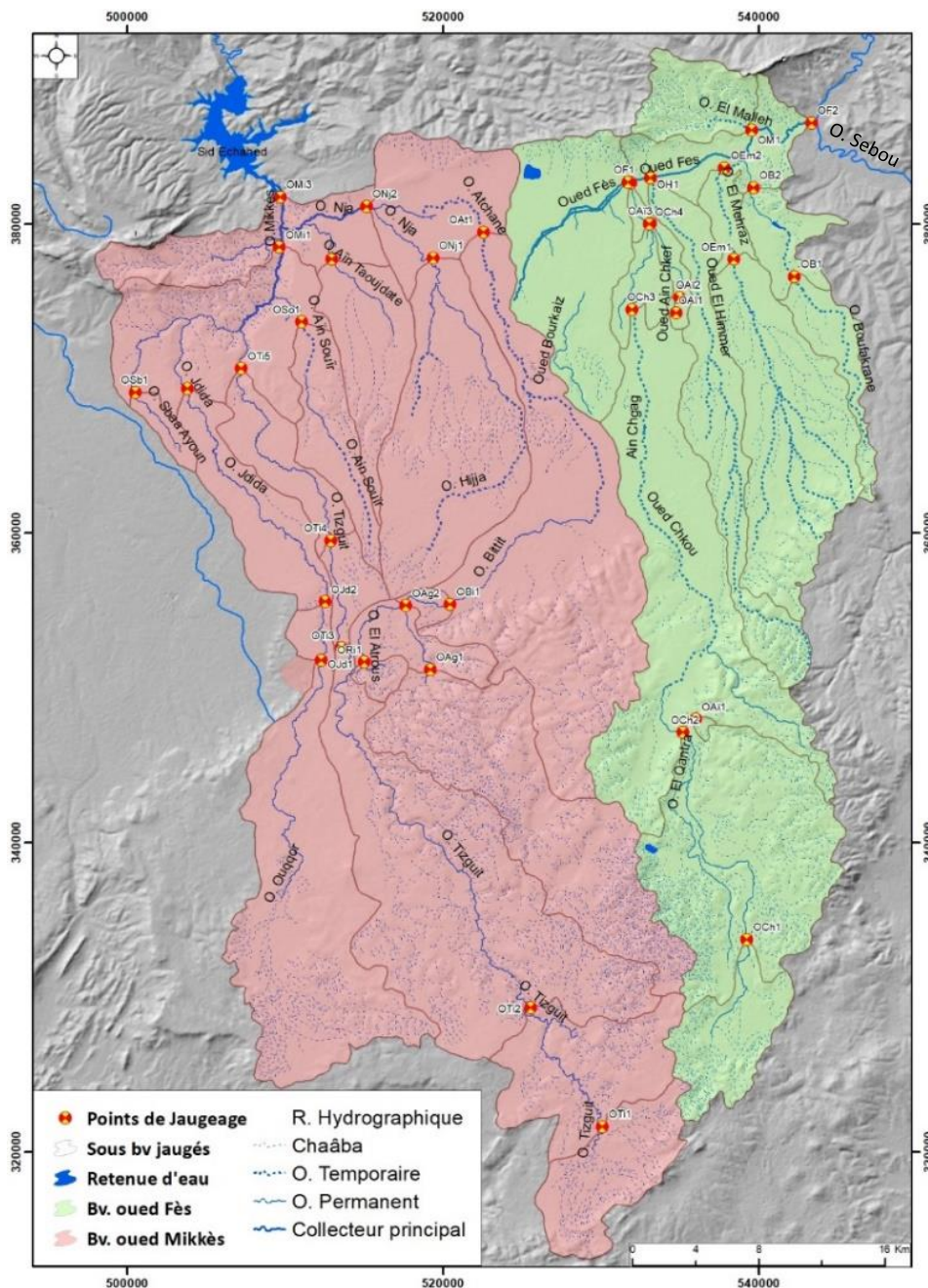


Figure 98: les sous bassins jautés avec leurs points de jaugeage

6. Quantification des écoulements de surface dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès

L'objectif d'après l'évaluation des écoulements de surface est lié à la quantification des ressources hydriques de surfaces dans le bassin versant de l'oued Fès et le bassin versant de l'oued Mikkès. Cette méthodologie s'appuie sur une investigation des données hydrométriques obtenues lors des campagnes de mesures effectuées entre 2014 et 2017. Ces données concernent les débits des cours d'eau des oueds drainant les bassins versants de l'oued Fès et Mikkès durant des périodes des bases eaux et des hautes eaux, et ce, en un régime hydrologique stabilisée non influencé par les précipitations et/ou les interventions humaines.

La quantification des débits des écoulements sera basée sur des séries de mesures ponctuelles de débit, afin d'étudier l'organisation des écoulements dans les deux bassins versants étudiés, en se basant _dans un premier lieu_ sur la quantification et l'étude de l'évolution des débits des oueds de l'amont jusqu'à l'aval à partir des profils hydrologique (axe 7). Dans un deuxième lieu, l'axe 8 sera focalisé sur la quantification du rondement des sous-bassins versant, tout en essayant de spatialiser leurs débits spécifiques via le système d'information géographique.

7. L'étude de la variation spatiotemporelle des écoulements de l'amont vers l'aval via les profils hydrologiques

Dans cet axe, les mesures des débits bruts des différents cours d'eau drainant les bassins des oueds Fès et Mikkès, seront exploitées pour déterminer la variation spatiotemporelle des écoulements de l'amont vers l'aval des oueds étudiées, grâce aux profils hydrologiques. Ce concept a été développé par le CEGUM (Centre d'Etudes Géographiques de l'Université de Metz) (François et al, 1994).

Le profil hydrologique permet de capturer quantitativement les modalités de l'alimentation d'un cours d'eau sur sa linaire ou sa surface (Obda et al, 2000 ; Lebaut, 2000), ainsi qu'il présente l'évolution cumulative du cours d'eau et renvoient ainsi les réalités géographiques du bassin versant où ils mettent en évidence « *la complexité des paramètres naturels intégrés du bassin* » (Sary, 1993). Donc, le profil hydrologique est représenté sur un graphique de type courbe qui montre l'évolution des débits bruts et des débits spécifiques du cours d'eau de

l'amont vers l'aval en fonction de la surface de bassin versant ou des points kilométriques hydrologiques (Lejeune et al., 1989 ; Obda, 2004).

7.1 Profils hydrologiques de l'oued Fès et ses affluents

Les données issues via les mesures ponctuelles des débits de l'oued Fès et ses affluents entre 2014 et 2017, en période d'étiage et hautes eaux produisent des conclusions très intéressantes concernant la variation spatiotemporelle des rendements hydrologiques des sous bassins versants. Les résultats obtenus sur terrain sont présentés sous forme de profils hydrologiques des différents affluents de l'oued Fès (Fig. 99).

D'une façon générale, les variations des écoulements sont fortement conditionnées par la variation des précipitations d'une année à l'autre. Mais pour notre cas, cette variation est liée principalement à deux facteurs importants : le premier est anthropique (usage et exploitation des ressources hydriques) et le deuxième est purement physique (la géologie et la physiographie des cours d'eau). La figure suivante traduit cette variation spatiotemporelle des écoulements de l'oued Fès et ses affluents en différentes périodes des campagnes de mesures. Deux principaux constats sautent aux yeux d'après la lecture de ce profil hydrologique (Fig. 99) :

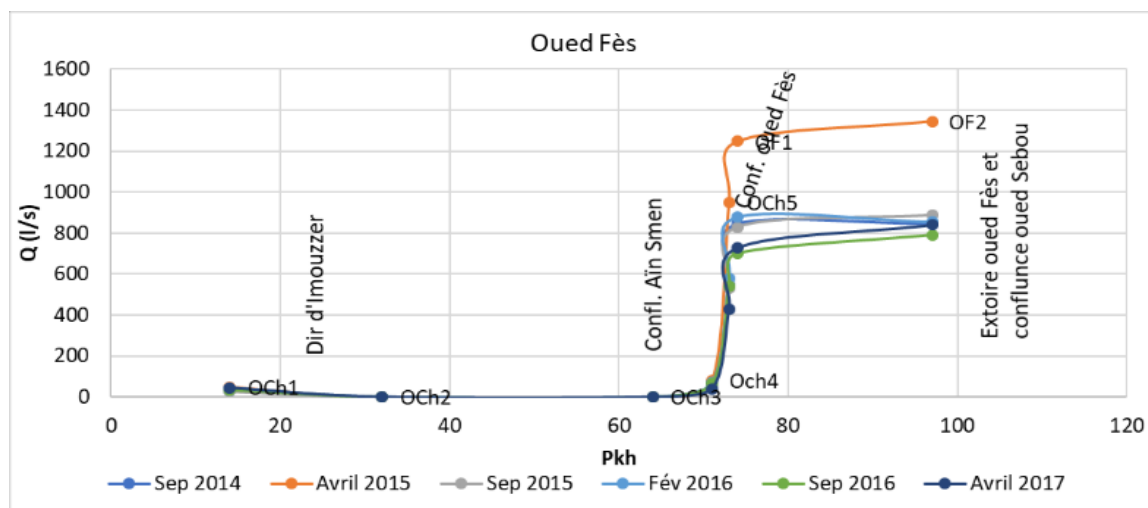


Figure 99: Profil hydrologique de l'oued Fès en différentes situations hydrologiques

- ✓ Premièrement, la grande variabilité spatiale et temporelle des écoulements de l'oued Fès et ses affluents, ce qui traduit le contraste et la diversité géographique de l'amont vers

l'aval, d'une part, ainsi que la différence des débits mesurés durant les hautes eaux et les étiages d'une année à l'autre, d'autre part.

- ✓ Deuxièmement, d'une façon paradoxale, le débit augmente de l'amont (humide) vers l'aval (peu arrosé). Cette augmentation du débit à l'aval est expliquée par les apports latéraux des affluents au niveau de la partie aval du Saïs.

Cette représentation générale du profil hydrologique de l'oued Fès cache beaucoup de détails. De ce fait, afin de bien l'analyser et comprendre l'évolution de son débit, nous allons le sectionner en quatre parties : La partie amont ; Au niveau du dir ; A partir des sources de résurgence à l'entrée de la ville de Fès ; La partie aval.

7.1.1 La partie amont

Malgré que les causses d'Ifrane et Imouzzer présentent la zone la plus arrosée et humide de l'aire d'étude, les débits de leurs écoulements de surface ne sont pas assez importants. En effet, les débits mesurés au niveau de l'oued El Quantra (OCH1) (Photo. 47) ne dépassent pas 100 l/s (Fig. 99) durant les hautes eaux et s'assèchent complètement durant les étiages. Cette situation est due à la lithologie carbonatée quasiment perméable, engendrant une grande infiltration au niveau des calcaires et dolomies du lias (Photo. 48).



Photo 47: Première point de jaugeage à l'amont de l'oued Chkou (Oued El Quantra). (Sept. 2016)



Photo 48: Calcaire dominant au niveau de l'amont de l'Oued Chkou. (Sept. 2016)

7.1.2 Un assèchement total au niveau du dir

Les dirs d'Imouzzer et Sefrou sont drainés pour les oueds Chkou, El Himmer, El Mehratz et Boufkrane. À ce niveau-là, ces oueds sont complètement à sec durant la plupart du temps (Photos : 49 et 50). Cette situation n'est pas due à la pénurie des ressources hydriques ; au

contraire, plusieurs sources à débits importants sont réparties tout au long du dir. Mais pourquoi cet assèchement ? Cela est dû tout d'abord aux pertes des écoulements à l'amont, mais surtout à cause des canaux d'irrigation (Séguia) (Photo : 51 et 51) capturant et déviant les débits des sources. A titre d'exemple, les débits de la source Ain Sultane à côté d'Imouzzer sont complètement capturé au niveau d'Ait Sbaa par plusieurs canaux d'irrigation. Cette source (OAS1) a un débit pouvant dépasser 300 l/s durant les saisons des hautes eaux (200 l/s en juin 2014).



Photo 49: situation de l'oued Chkou au niveau d'Imouzzer Kenddar. (Sep. 2016)



Photo 50: situation de l'oued Chkou au niveau de dir. (12 avril. 2015)



Photo 51: Photo de la Seguia d'Ain Sultane. (12 avril 2015)



Photo 52: Source Ain Sultane. (12 avril 2015)

7.1.3 Retour des écoulements à partir des sources du Saïs puis l'agglomération de Fès

Après l'assèchement des oueds tout au long du plateau de Saïs, un retour des écoulements est observé à partir des sources de résurgence de la partie basse de Saïs, ainsi qu'à partir de l'agglomération de Fès. En effet, une augmentation claire des débits est liée principalement à l'abondance des écoulements en prévenance des sources de résurgence d'Ain Chkef, d'Ain

Smen, Bergama, Bourkaiz... ainsi que l'apport du réseau d'assainissement de la ville Fès concernant les oueds El Himmer, El Mahrez et Boufkrane.

Considérée comme la source la plus importante, le débit de la source Ain Chkef est relativement constant (en hautes eaux comme en basses eaux). D'après les campagnes de jaugeages effectuées entre 2014 et 2017, le débit de la source Ain Chkef a été dans l'ordre de 758 L/s au mois de septembre de 2014, 617 L/s en avril 2015 et 689 L/s au même mois de l'année 2017. Ces apports hydriques sont importants par apports aux autres affluents de l'oued Fès. Le profil hydrologique ci-dessous (Fig. 100) récapitule les résultats obtenus d'après les campagnes de jaugeages réalisées entre 2014 et 2017.

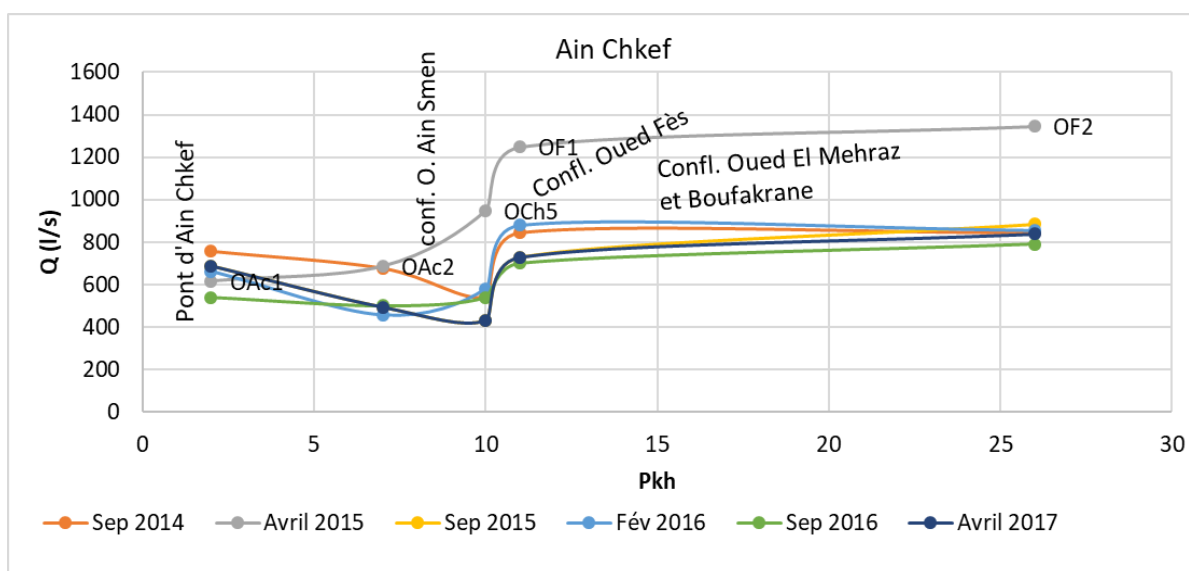


Figure 100: Profil hydrologique de l'oued Ain Chkef en différentes situations hydrologiques

Au niveau du premier point de mesure (OAc1), les débits connaissent une légère variation des apports de la source d'Ain Chkef. Cette variation est due à la fluctuation et la variabilité des apports pluviométriques. Par ailleurs, il faut signaler que les débits de l'oued Ain Chkef connaissent un abaissement avant de rejoindre oued Ain Smen au niveau du quartier Zouagha de la ville de Fès (OAc2). Cette diminution de débits est due aux pertes et des prélèvements pour l'irrigation. Après la confluence avec l'oued Ain Smen (Photo. 54) les débits atteignent 1 m³/s. En avril 2015 le débit calculé a été dans les environs de 1200 l/s (Photo.53). En fin, dans la partie de confluence avec l'oued Fès (OCh5) (Photo. 55), le débit connait une augmentation visible, mais malheureusement, les résultats obtenus à ce niveau présentent plusieurs incertitudes à cause du phénomène du retour, dû essentiellement à la présence

d'une végétation très dense, d'un part, et l'influence de la mappe phréatique qui affleure à ce niveau, causant une stagnation des écoulements, d'autre part (Photo. 56).



Photo 53: Oued Ain Chkef au niveau du forêt Ain Chkef. (11 Avr 2015)



Photo 54: Oued Ain Smen au niveau du quartier Zouagha de Fès. (7 Sep. 2014)



Photo 55: Oued Ain Chkef à l'aval. (8 Sep. 2015)



Photo 56: Présence d'une végétation dense (oued Fès amont). (20 Sept. 2015)

Pour ce qui est de l'oued Ain Smen, il rejoint oued Ain Chkef au quartier Zouagha (OCh4). Avant la confluence, son débit mesuré n'a jamais dépassé 100 l/s durant les périodes de jaugeages. Il a été dans l'ordre de 84,40 l/s en juin 2014, 82,7 l/s en mai 2015, 59 l/s en septembre 2015 et de 70 l/s en mai 2016.

En ce qui concerne l'oued El Mehraz qui rejoint oued Fès à l'entrée de la médina de Fès, ses débits n'ont pas connu une grande variation durant les différentes campagnes de jaugeage. Les écoulements de l'oued El Mehraz sont constitués principalement des apports du réseau d'assainissement des grands quartiers de la ville de Fès (quartiers Monfleuri, Najriss, Sidi Brahim...). C'est pour cela que son débit est relativement constant durant les périodes non influencés par les précipitations. Cela est illustré dans le profil hydrologique de l'oued El

Mehraz (Fig. 101) montrant que son débit n'a jamais dépassé 200 L/s durant toutes les périodes de mesures. Son débit avoisinait 150 L/s en avril 2015 et 140 L/s en avril de 2017.

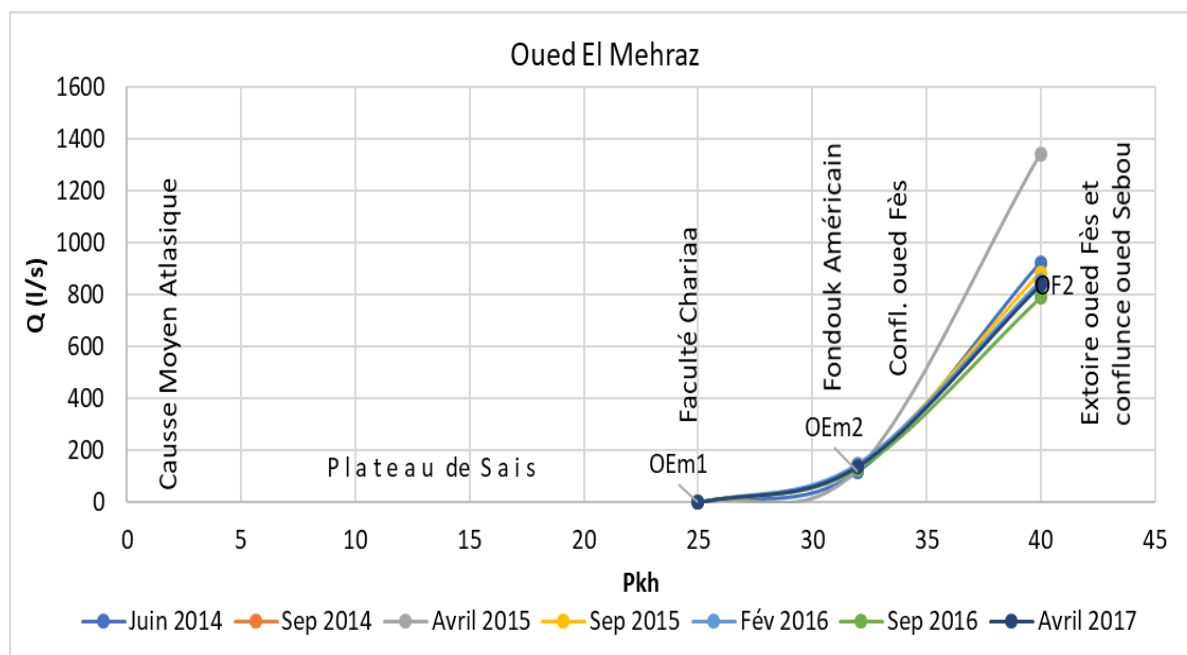


Figure 101: Profil hydrologique de l'oued El Mehraz en différentes situations hydrologiques

L'oued Boufkrane est un affluent de la rive droite du cours d'eau principal de l'oued Fès. Il rejoint ce dernier à l'entrée de la médina de Fès. Il s'écoule du dir de Sefrou, à partir de la source Ksiksou alimentant son débit saisonnier. Faute d'accessibilité, le premier point de jaugeage effectué correspond à l'amont du barrage El Gaada.

D'après le profil hydrologique de l'oued Boufkrane, à partir de l'entrée du barrage collinaire El Gaada, quelques ruisseaux alimentent l'écoulement de l'oued Boufkrane. Son débit mesuré en septembre 2015 a été calculé à 135 l/s. À l'aval (OB2), nous signalons que la variation des écoulements de cet affluent durant les campagnes de mesures a toujours été influencée par les rejets liquides du quartier Aouinat El Hajjaj. La variation des débits à ce niveau ne dépasse pas 300 l/s. Il a été dans l'ordre de 135 l/s en Septembre 2014 et 310 l/s en avril 2017.

Enfin, l'oued Malleh est le seul affluent de la rive gauche de l'oued Fès. Il prend sa naissance au niveau des rides du Préfif et a été caractérisé par un assèchement total durant toutes les périodes de mesures.

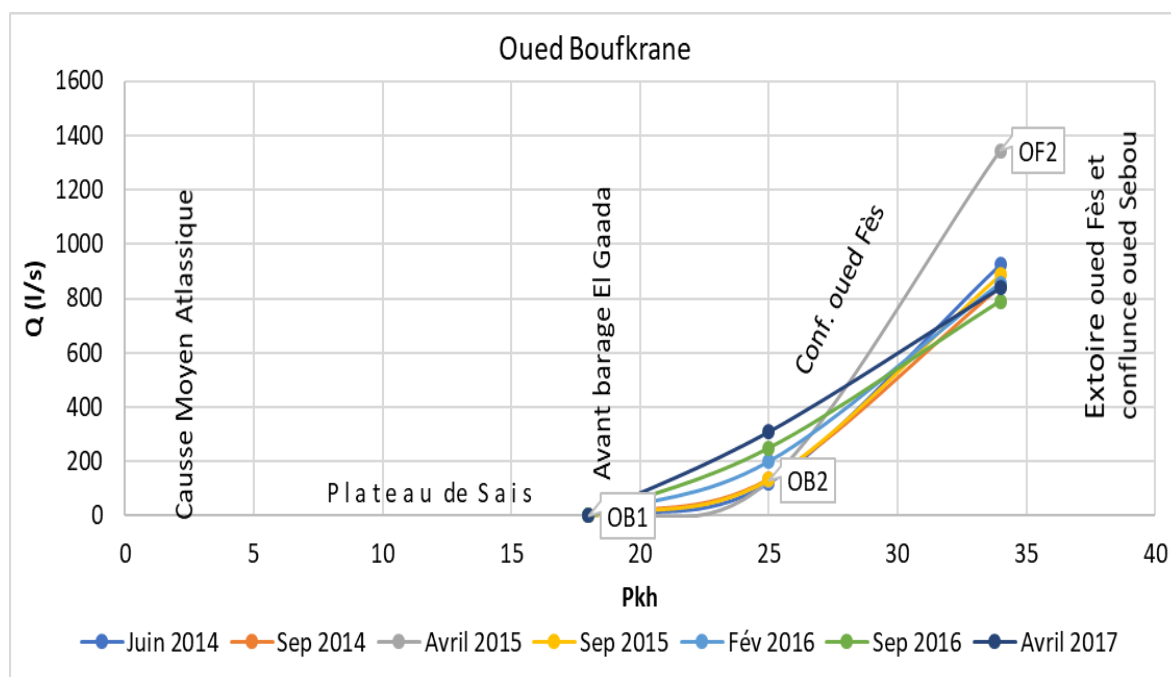


Figure 102: Profil hydrologique de l'oued Boufkrane en différentes situations hydrologiques

7.1.4 Une éventualité de débit au niveau d'exutoire de l'oued Fès

Dans l'exutoire de l'oued Fès (OF2), l'augmentation des débits est due aux affluents qui alimentent ce cours d'eau. Durant les différentes périodes de mesure, on a observé une grande fluctuation du volume d'eau, qui dépend, à fois, des apports des oueds à débit naturels et/ou artificiels (rejets domestiques et/ou industriels). En effet, dans cette partie, les débits de l'oued Fès aval (Photo. 66) se caractérisent par une grande fluctuation dépendant de plusieurs facteurs physique ou anthropique. Mis à part que l'oued Fès présente le collecteur principal de plusieurs affluents, son débit est influencé également par les apports des canaux d'assainissement d'une ville abritant plus d'un million d'habitants, ainsi que les apports instantanés de la Station d'Épuration des Eaux Usées de Fès (STEP) (Photo. 57 et 58). En dépit de ces facteurs, une perturbation des écoulements est observée au niveau du dernier point de mesure (OF2). Les débits varient plusieurs fois dans le même jour. À partir des campagnes de jaugeages, le débit de l'oued Fès aval a atteint 1340 l/s en avril 2015 et seulement 790 l/s en septembre 2016.

En générale, les profils de l'oued Fès et ses affluents donnent une idée sur la situation des ressources hydriques ainsi que l'évolution cumulative des débits de l'amont vers l'aval du bassin versants de l'oued Fès. L'augmentation des débits de l'amont vers l'aval reflète tous les

facteurs anthropiques et physiques qui interviennent d'une façon directe ou indirecte sur le comportement hydrologie de la zone en question.



Photo 57: Station d'épuration des eaux au niveau de la médina de Fès. (15 Janv. 2020)



Photo 58: Station d'épuration des eaux usées de Fès STEP. (Www.radeef.ma)



Photo 59: Oued Fès au niveau du pont Marjane. (6 Avr 2015)



Photo 60: Oued Fès au niveau du Quartier Ain Nokbi. (6 Avr 2015)

7.2 Profils hydrologiques de l'oued Mikkès et ses affluents

Après avoir analysé les profils hydrologiques de l'oued Fès avec ses affluents, nous allons faire de même pour ce cas du bassin versant de l'oued Mikkès. Comme il a été déjà signalé dans ce chapitre, le choix des points de jaugeage de ce bassin versant ont été réalisées en se basant sur plusieurs critères. Ces dernières dépendent de la géologie, les zones des émergences des sources, les points de confluences, ainsi que les zones des prélèvements (dérivation des eaux vers les seguias). Tout comme le cas de l'oued Fès, afin d'effectuer une analyse détaillée de l'évolution des écoulements de l'oued Mikkès et ses affluents, nous allons le sectionner en trois tronçons :

1. La partie amont

2. À partir du plateau de Saïss

3. La zone de confluence en aval

7.2.1 Partie amont très influencée par sa géologie

Nous rappelons que l'amont du bassin versant de l'oued Mikkès est drainé par l'oued Tizguit. Sept points de mesures ont été accomplis tout au long de cet oued qui présente le plus grand affluent du bassin versant de l'oued Mikkès. La figure 103 suivante montre l'évolution des débits écoulés de l'amont vers l'aval du bassin versant de l'oued Mikkès.

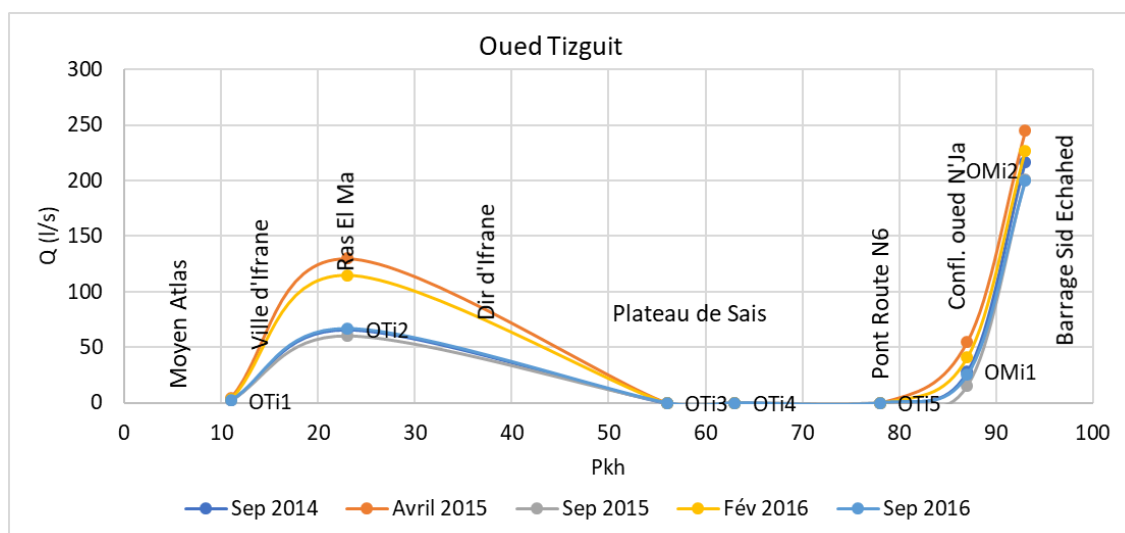


Figure 103: Profil hydrologique de l'oued Tizguit en différentes situations hydrologiques

D'après les mesures effectuées dans le premier point (OTi1) depuis l'amont (Photo. 61), le débit ne dépasse pas 5 l/s lors des campagnes de jaugeages, en hautes eaux comme en étiages (4 l/s en avril 2015 et 2 l/s en septembre 2016) (Photo 61 et 62). Ces débits très faibles sont liés à la rareté des sources dans cette partie, ainsi que les pertes dans les roches carbonatées très fissurées.

À sa sortie de la ville d'Ifrane (OTi2), le débit de l'oued Tizguit connaît une augmentation grâce à la présence des sources karstiques qui alimentent son écoulement au niveau de la source « vital », ainsi que la « source de Zerrouka ». Les débits de cette dernière dépassent 100 l/s durant les mois des hautes eaux qui correspondent à la période de la fonte de la neige. Son débit mesuré en avril 2015 a été dans l'ordre de 115 L/s. Pendant l'étiage, le débit diminue, il a été dans les environs de 67 L/s en septembre 2016.



Photo 61: situation de l'oued Tizguit au niveau de l'amont (Otl1). (Sep. 2016)



Photo 62: Oued Tizguit au niveau d'amont. (Sep. 2016)

Le troisième point de mesure correspond au dir d'Ifrane (OTI3). À ce niveau-là, les coulées basaltiques ainsi que les roches carbonatées contribuent à l'infiltration d'une grande partie du ruissèlement, de ce fait, l'oued Tizguit va perdre ses apports hydriques et devient à sec avant de rejoindre le plateau de Saïs. Les écoulements dans ce tronçon ne réapparaissent qu'à partir des épisodes pluvieux de fortes intensités.



Photo 63: Oued Tizguit au niveau d'Ain vital. (Sep. 2016)



Photo 64: Assèchement de l'oued Tizguit au niveau du dir (Avril 2016)

En général, la variation des écoulements de l'oued Tizguit au niveau du Moyen Atlas dépend essentiellement de la géologie qui offre une grande perméabilité des terrains. Malgré que cette zone reçoive d'importantes précipitations pluviales et nivales, les écoulements de surface sont faibles à l'exception de quelques émergences des sources karstiques qui alimentent l'oued Tizguit.

7.2.2 Au niveau du plateau de Saïss

Le contact du dir avec le plateau de Saïs se caractérise par la présence de plusieurs sources très importantes (Ain Bittit, Ain Ageumgeum, Ain Ribaa, Ain Atrous, Ain Akkous...) En principe, les grands débits de ces sources (chapitre 4) vont contribuer à l'augmentation des débits des oueds en prévenance du Moyen Atlas. Mais en réalité, le profil hydrologique montre le contraire. En effet, durant toutes les campagnes de jaugeages effectuées, les oueds sont à secs. Cela est dû, principalement aux canaux de dérivations destinés à l'irrigation et/ou à l'alimentation des villes limitrophes en eau potable (Photos : 65, 66, 67, et 68).

L'influence des pertes dues aux infiltrations au niveau du calcaires du lias et des coulées basaltiques du quaternaire contribue également à l'assèchement des oueds au niveau du plateau de Saïs (Oued Tizguit). Ces infiltrations ressurgissent sous forme de sources un peu en aval ou alimentent latéralement la nappe Plio-Quaternaire du Saïs en période d'étiage.



Photo 65: Dérivation des eaux de la source de Bittit vers une seguia. (25 mai 2016)



Photo 66: Dérivation des eaux de la source d'Ain Atrous vers une seguia (29 Fév. 2016)



Photo 67: Dérivation des eaux de la source d'Ain Akkous vers une seguia (25 mai 2016)



Photo 68: Dérivation des eaux de la source El Rhara vers une seguia. (8 Sep. 2016)

En ce qui concerne le débit des sources, d'après les différentes compagnes de jaugeages, on a remarqué que leurs débits est peu variable. Le débit de la source de Ribaa Amont et Aval a été estimé à 666 l/s en février 2015 et 510 l/s février 2016. Celui de la source de Bittit atteint 800 l/s en septembre 2015 et 857 l/s en avril 2016. On signale que l'étude de La variation des débits des sources sera bien illustrée dans le prochain chapitre.

7.2.3 La zone de confluence à l'entrée du barrage Sid Echahed

En s'approchant de l'exutoire, les débits des affluents de l'oued Mikkès augmentent grâce à plusieurs sources qui alimentent les oueds. Pour l'oued N'Ja la source El Rhara joue un rôle primordial pour alimenter ce cours d'eau, les débits dans le point (ONJ1) (Photo. 68) variant durant les différents périodes de jaugeages. Dans le mois de septembre 2015 le débit mesuré a été dans l'ordre de 215 l/s puis 300 l/s en avril 2016 et 310 l/s en avril 2017.

En ce qui concerne oued Jdidda, la source d'Akkous (Photo. 67) aliment ce cours d'eau au niveau du plateau de Saïss avec un débit de 120 l/s en septembre 2015 et 200 l/s en avril 2015 et 170 l/s en mois d'avril 2017. Une grande quantité des débits de cette source est perdue dans les canaux d'irrigations. Le débit qui arrive jusqu'à la confluence ne dépasse pas 30 L/s au niveau du pont de la route N6.

Pour conclure cet axe, on peut dire les profils hydrologiques donnent une bonne représentation graphique de l'évolution des débits tout au long des cours d'eau. En termes de résultats, nous signalons que malgré que l'amont des deux bassins versants étudiés soit le plus humide, les écoulements à ce niveau-là ne sont pas assez important à cause du facteur lithologique favorisant l'infiltration des lames d'eau précipitées.

L'action anthropique influence également l'évolution des débits des cours d'eau en question. Les canaux d'irrigation ou d'alimentation en eau capturent la majorité des débits des oueds, alimentée en principe par les eaux des grandes sources de débordement et/ou des résurgences au niveau du plateau de Saïs. Les rejets liquides domestiques et/ou industrielles influences profondément le rendement des oueds. La spatialisation de ces rendements hydrologiques fera l'objet du prochain axe.

8. Spatialisation des rendements hydrologiques : Cartographie des débits spécifique

Après avoir réalisé et analysé les profils hydrologiques des oueds Fès et Mikkès ainsi que leur affluents, une investigation spatiale sera effectuée dans cet axe, afin d'apprécier les rendements de chaque sous bassins versants jaugés dans la zone d'étude. Pour cette ambition, il faut tout d'abord calculer le débit spécifique de chaque sous bassins jaugé. Ce dernier s'exprime en **L/s/km²** et représente la production en eau du bassin unitaire. Il s'écrit comme suit :

$$Qs = Q / s$$

Qs : Débit spécifique en l/s/km²

Q: Débit (l/s)

S: Surface (Km²)

Cette équation a été exploitée afin de calculer les débits spécifiques des différents sous-bassins de l'oued Fès et l'oued Mikkès. Puis, grâce au Système d'Information Géographique ArcGIS®, on a pu élaborer la carte de rendement des différents situations hydrologiques pour les deux bassins versants étudiés. Les résultats obtenus seront représentés sur des cartes de rendements hydrologiques des différents situations hydrologiques. Il s'agit d'une représentation des débits spécifiques de chaque bassin élémentaire. Cette carte mis en évidence l'apport ou la perte d'eau entre deux points de mesure successifs en s'abstrayant du poids des apports latéraux (Arts I., François D., 1998 ; Arts I., Sary M., 2000, Obda Kh. 2004).

La figure 104 suivante présente une illustration de rendement hydrologique de l'oued Ain Chkef au niveau du bassin versant de l'oued Fès.

La cartographie des débits spécifiques permet d'apprécier et de quantifier la situation des ressources en eau de surface de

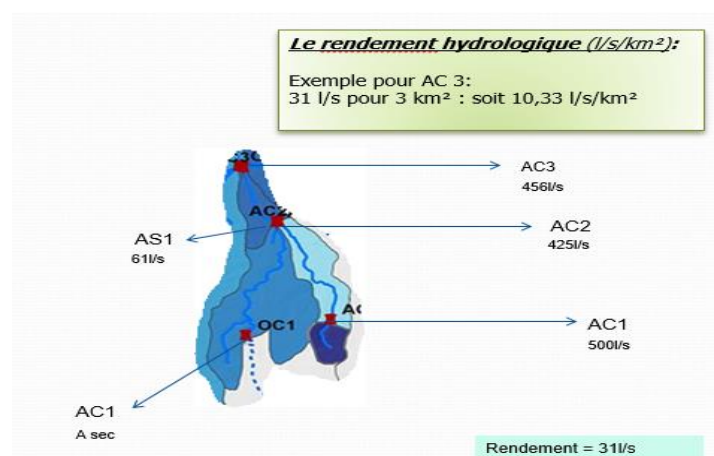


Figure 104: Méthodologie adoptée pour la représentation du rendement hydrologique

la zone d'étude, en différentes situations hydrologiques ; c'est-à-dire en périodes des étiages et hautes eaux.

8.1 Rendement hydrologique en périodes des étiages

À l'instar des profils hydrologiques, les cartes des rendements hydrologiques en périodes des étiages démontrent une grande disparité spatiale. La variation des apports ainsi que les déficits hydriques des sous bassins de l'oued Fès et l'oued Mikkès sont illustrés dans les figures 105, 106 et 107). Ces trois cartes présentent la situation des ressources en eau de surface en périodes des étiages des années 2014, 2015 et 2016. Cette situation est pratiquement la même durant les trois années jaugées.

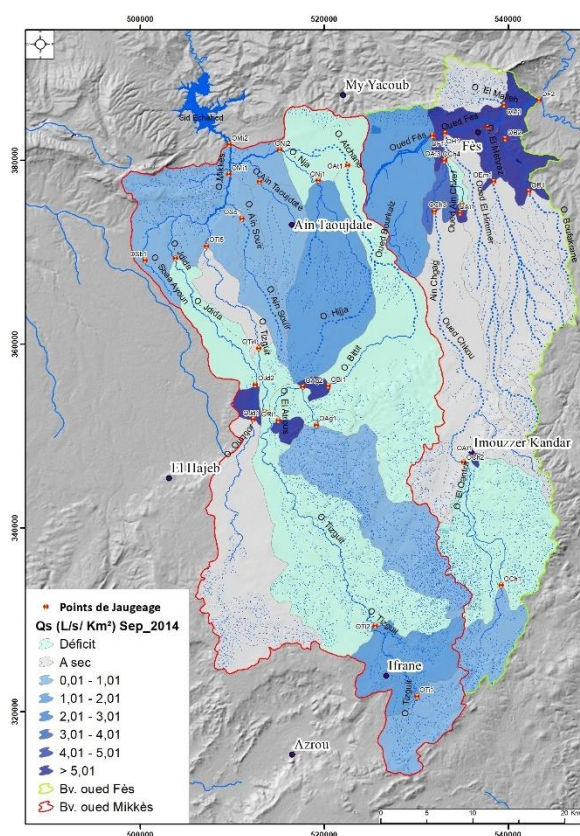


Figure 105: rendement hydrologique par bassin unitaire (Sep. 2014)

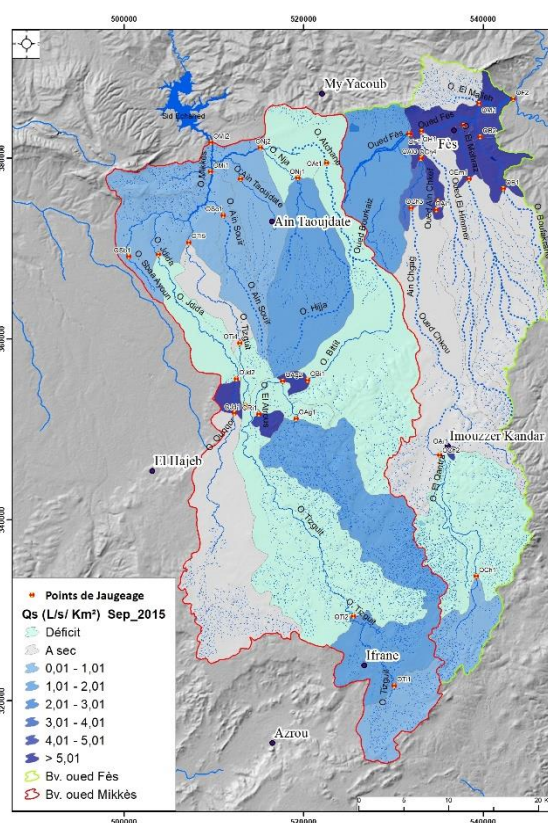


Figure 106: rendement hydrologique par bassin unitaire (Sep. 2015)

Le rendement hydrologique au niveau de l'amont des deux bassins versants étudiés est presque équitable. Le débit spécifique calculé à l'amont du bassin versant de l'oued Fès (OCH1) a été dans l'ordre 0,64 l/s/ Km² en septembre 2014, 0,57 L/s/ Km² en septembre 2015 et 0,74 L/s/ Km² en septembre de 2016.

Ce rendement devient déficitaire en descendant un peu en aval (OCH2). Cette situation est due aux prélèvements destinés à l'irrigation des cultures implantées au niveau de la vallée de l'oued Chkou. En ce qui concerne l'amont du bassin versant de l'oued Mikkès (OTI1) ; le débit spécifique avoisinait $0,4 \text{ L/s/Km}^2$ pendant la période des étiages des trois années observées. Ce faible rendement à l'amont des deux bassins versants étudiés est expliqué par la lithologie très perméable, ainsi que la pression anthropique (irrigation des cultures et des rosacées) à ce niveau du bassin.

Au niveau du dir, les rendements hydrologiques des deux bassins sont très réduits à néant pendant la période des basses eaux. Un assèchement total caractérise les cours d'eau drainant cette partie des deux bassins à cause des prélèvements (séguias) et des pertes (infiltrations).

Cette fois, en descendant vers le plateau de Saïss, on observe une grande différence des rendements hydrologiques entre le bassin versant de l'oued Mikkès et celui de Fès. En effet, contrairement aux oueds secs drainant le bassin versant de Fès à ce niveau-là, les rendements

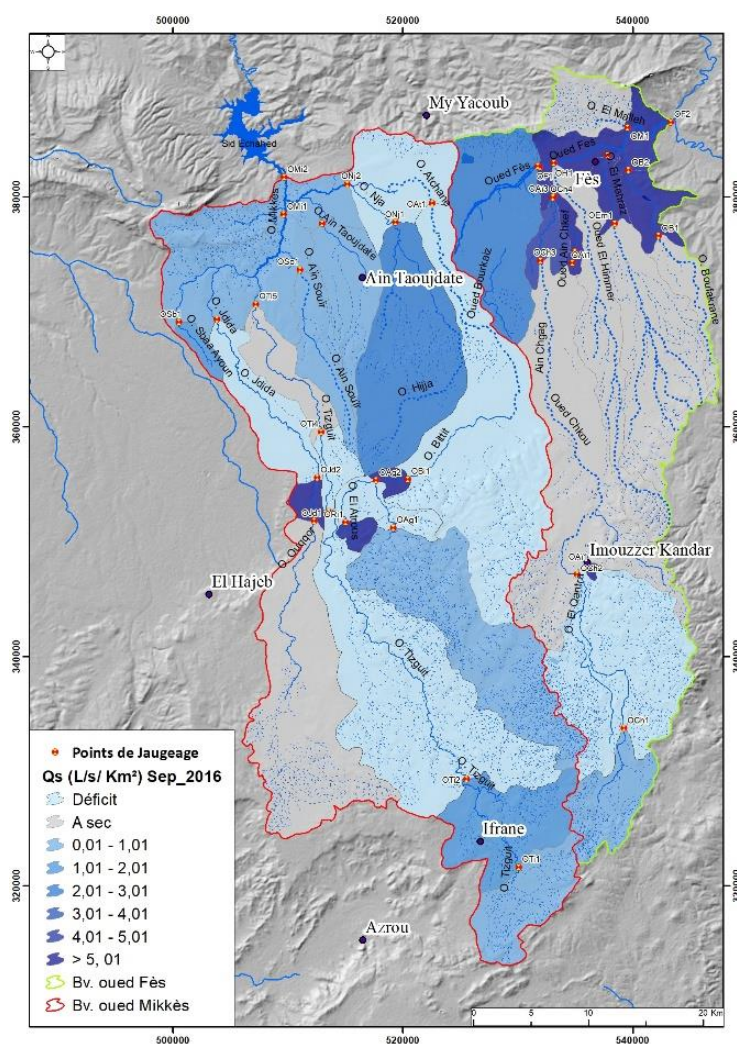


Figure 107: rendement hydrologique par bassin unitaire (Sep. 2016)

hydrologiques au niveau du bassin de Mikkès sont assez importants (*par rapports aux autres domaines de la zone d'étude*), grâce aux grandes sources de débordement d'Ain Bittit, Ageumgeum, Ribaa amont et aval qui réalimentent les oueds Tizguet et Jdida. En septembre 2015, le débit spécifique calculé pour le bassin d'Ain Ageumgeum produit $128,5 \text{ l/s/km}^2$ et $17,11 \text{ L/s/km}^2$ comme débit spécifique du bassin d'Ain Akkous. Après ces résurgences, le

rendement hydrologique devient déficitaire, encore une fois, à cause des prélèvements des usagers et des déviations des débits.

En aval, plusieurs sources augmentent le rendement hydrologique des sous-bassins de l'oued Fès. Pour le bassin versant d'Ain Smen (Och4), le débit spécifique avoisine 4 L/s/Km² en période d'étiage 6 L/s/Km² en période des hautes eaux. Le bassin d'Ain Chkef (OCh5), quant à lui, produit 161,77 L/s/Km² en avril 2015 et 175 L/s/Km² en avril 2017. Enfin, il faut signaler que les rejets liquides de l'agglomération de Fès produisent des rendements hydrologiques important. A titre d'exemple, le débit spécifique du bassin de l'oued Boufkrane est dans les environs de 11 L/s/Km² durant les périodes d'étiage. En ce qui concerne le rendement hydrologie en aval de l'oued Mikkès ; il est de l'ordre de 1,55 L/s/Km² au niveau l'oued N'Ja (ONj1), puis diminue à 0,1 L/s/Km² au niveau du dernier point jaugé à l'exutoire.

De toute façon, les rendements hydrologiques en périodes d'étiage diffèrent énormément d'un sous bassin à un autre. Les débits spécifiques sont généralement très faibles et ne changent pas trop d'une année à l'autre. La géologie et les pressions anthropiques sur les ressources hydriques de surface influence profondément les rendements hydrologiques des bassins unitaires ainsi que la répartition des zones d'excédents et déficits hydriques en périodes des étiages. Alors comment ce serait la situation en périodes des hautes eaux ?

8.2 Rendement hydrologique en périodes des hautes eaux

Il est clair que la période des hautes eaux se caractérise par une augmentation du rendement hydrologique des cours d'eau. En effet, les débits jaugés au niveau des oueds drainant les deux bassins étudiés sont beaucoup plus importants en périodes des hautes eaux par rapport aux mois d'étiage. Ce volet de l'étude vise à évaluer cette augmentation du rendement hydrologique, en adoptant la même méthode adoptée ci-dessus (cartographie des débits spécifiques).

Les rendements hydrologiques des sous-bassins en période des hautes eaux sont présentés dans les figures 108, 109 et 110. Contrairement à la période d'étiage, les débits spécifiques des sous-bassins changent d'une année à l'autre. Le mois d'avril 2015 a été caractérisé par un rendement hydrologique beaucoup plus important que les deux années qui le suivent. En effet, en 2016 et 2017 les apports pluviométriques ont été en dessous de la moyenne, influençant ainsi les écoulements de surface.

En ce qui concerne l'amont du bassin versant de l'oued Fès (OCH1), le débit spécifique a diminué de 1,06 L/s/Km² en avril 2015 à 0,96 L/s/Km² en avril 2016 et 2017. En arrivant au cause d'Imouzzer (OCH2), le rendement devient encore une fois déficitaire à causes des facteurs physiques et anthropiques déjà soulignés ci-dessus.

Au niveau du plateau de Saïss les apports hydriques en périodes des hautes eaux sont toujours liés aux émergences des sources de débordements. Mais, malheureusement, même en périodes humides, les dérivations des débits des sources vers les seguias d'irrigation causent un assèchement total de tous les oueds à ce niveau (en absence des précipitations bien évidemment).

La partie aval de l'oued Fès (photo. 69), quant à elle, est assez productive en ressources hydrique de surface. Les débits des sources Ain Chkef (Photo. 70), Ain Smen, Bergama, Bourkaiz... sont beaucoup plus volumineux en périodes des hautes eaux par rapport aux étiages. Elles produisent un rendement hydrologique important. Par exemple, le débit spécifique du bassin de la source d'Ain Chkef a été estimé à 308,5 L/s/km² en avril 2015. En descendant vers la zone de confluence, les rendements sont encore positifs. Le débit spécifique de l'oued Boufkrane a été calculé à 11,54 L/s/km² et 8,33 L/s pour l'oued El Mehras en avril 2016. La majorité de ces rendements est constituée bien évidemment des rejets liquides en prévenance de la ville de Fès.



Photo 69: Oued Aïn Chkef en avril 2015



Photo 70: L'aval de l'oued Fès en avril 2015

Enfin, il faut signaler que les débits spécifiques au niveau de l'exutoire de l'oued Fès (OF2) sont assez aléatoires en périodes des hautes eaux. Les rendements hydrologiques dépendent des fluctuations des débits des sous bassins versants, mais surtout le l'éventualité de la

quantité des rejets liquides produits par la ville de Fès. Ces débits se sont variés entre 13,76 L/s/Km² en avril 2015, 17,26 L/s/Km² en avril 2016 et 14,88 L/s/km² en avril 2017.

En ce qui concerne le bassin versant de l'oued Mikkès ; tout comme en périodes d'étiage, la lithologie et les prélèvements des ressources hydriques de surface contrôle le rendement hydrologique des sous bassins en périodes des hautes eaux. Les cartes 108, 109 et 110 montrent la différence du rendement de chaque sous bassin versant de l'amont vers l'aval. Au niveau de l'oued Tizguit à l'amont (OTI1), le rendement hydrologique est faible. Il ne dépasse pas 1 l/s/km², c'est-à-dire presque le même rendement en période d'étiage.

En descendant un peu en aval (OTI2), le rendement hydrologique augmente pour dépasser 1 l/s/Km², puis devient déficitaire au niveau du dir d'Ifrane (OTI3). À l'exception du rendement important des sources Bittit, Ain Ageumgeum, Ribaa amont et Ribaa aval, tous les sous bassins au niveau du plateau de Saïs ont un rendement qui varie entre 1 et 3 l/s/km².

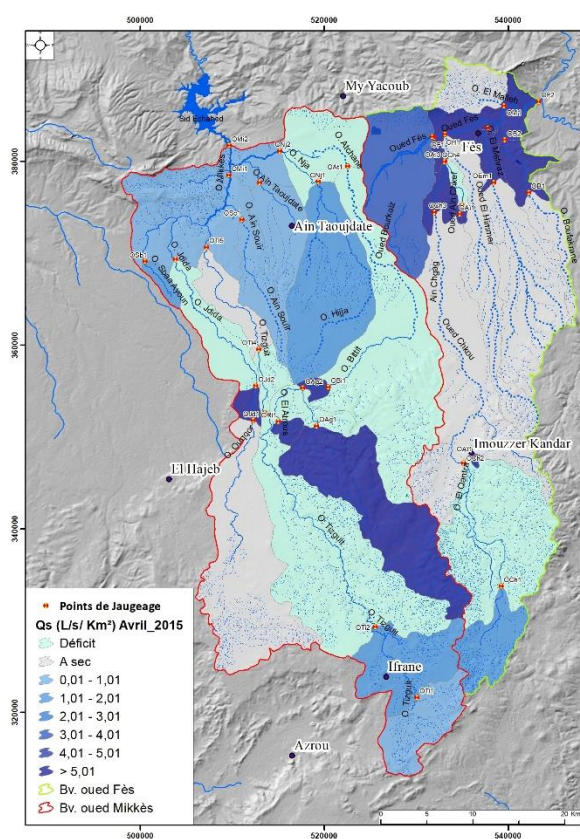


Figure 108: Rendement hydrologique par bassin unitaire (Avril. 2015)

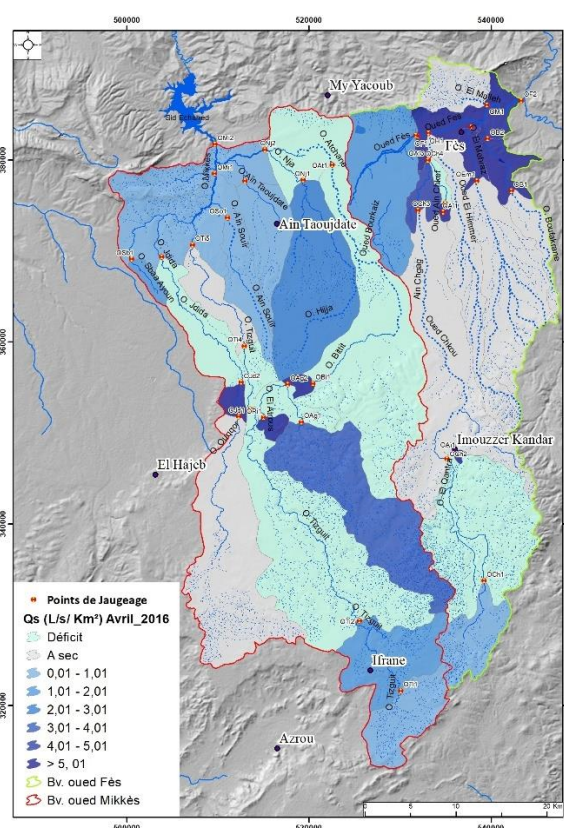


Figure 109: Rendement hydrologique par bassin unitaire (Avril. 2016)

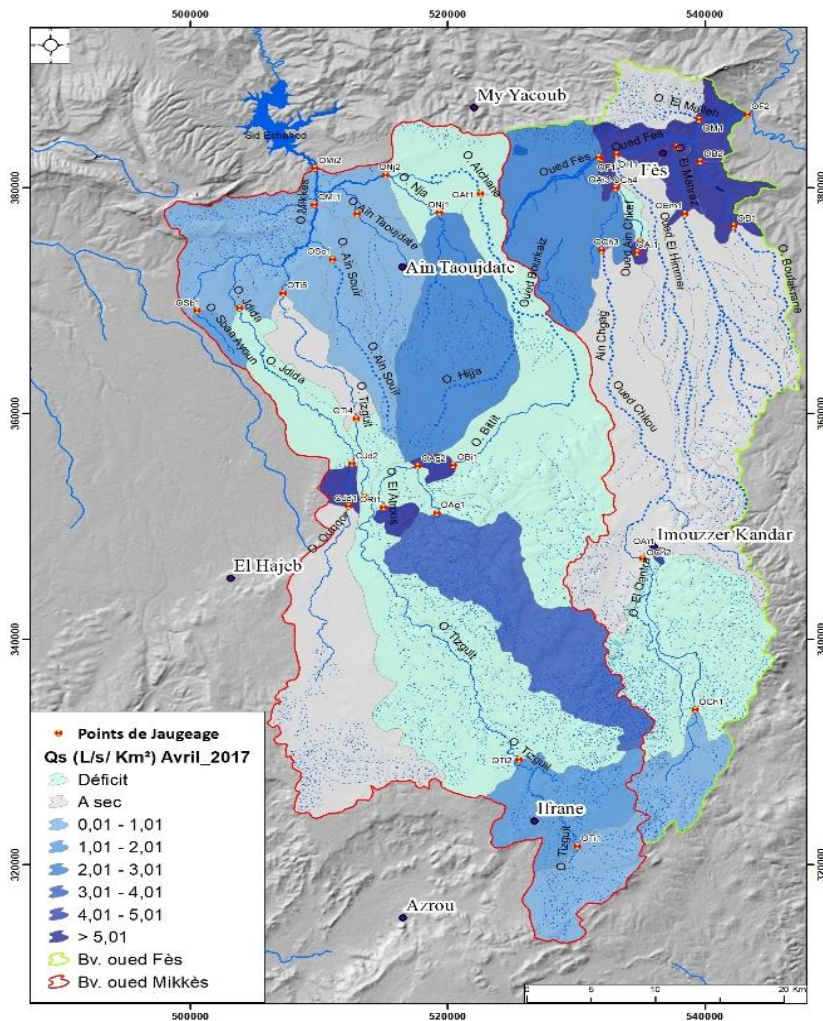


Figure 110: Rendement hydrologique par bassin unitaire (Avril. 2017)

CONCLUSION DU CHAPITRE

L'appréciation des ressources hydriques de surface est une opération délicate, qui demande plusieurs campagnes de jaugeages dans des conditions favorables et en différentes situations hydrologiques. Les méthodes d'acquisition des données hydrologiques sont très diverses. Face à cette diversité, le choix de la méthode adéquate présente une étape axiale. En ce sens, la méthode d'exploration du champ des vitesses nous a permis de mesurer les débits de tous les oueds drainant les bassins versants des oueds Mikkès et Fès. Les points de jaugeages ont été choisis en fonction de plusieurs critères permettant de quantifier l'évolution des débits des oueds ainsi que les rendements hydrologiques de chaque bassin unitaire.

En termes de résultats obtenus dans ce chapitre, on rappelle que malgré que l'amont des deux bassins versants étudié soit le plus arrosé, les écoulements de surface ne sont pas assez importants, à cause de la lithologie très perméable et des prélèvements qui diminuent les

débites des oueds et par conséquent leur rendement hydrologique qui ne dépasse pas 1 litre/s/km² dans cette partie de la zone d'étude. En arrivant au plateau de Saïss, les oueds sont réalimentés par plusieurs sources qui soutiennent leur écoulement de base. Enfin, en aval, l'acheminement et l'accumulation des débits du réseau hydrographique produit un rendement hydrologique important, sans négliger l'apport du réseau d'assainissement de l'agglomération de Fès qui contribue à l'augmentation du débit spécifique de l'oued Fès.

Enfin, il faut signaler que les résultats obtenus dans ce chapitre sont, malheureusement, très conditionnés par la pénurie des précipitations qui a caractérisé les trois années jaugées (2015, 2016 et 2017), ainsi que l'influence des prélèvements qui peuvent changer d'une année à l'autre. Or, on estime que ces rendements hydrologiques pouvaient être dû plus importants pendant les années les plus humides, surtout que les besoins des usagers en eau ne seront pas (en principe) très volumineux par rapport aux années sèches. C'est pour cela qu'il faut considérer ces résultats comme représentatifs, seulement pour la période des campagnes de jaugeages, et non pas pour toutes les situations hydrologiques qui caractérisent les deux bassins versants étudiés. Par ailleurs, le fait que les rendements hydrologiques de surface soient faibles ne veut pas forcément dire que la zone d'étude connaît un stress hydrique ou un bilan déficitaire. Car, quoique les ressources en eau de surface soient importantes, celles souterraines sont plus importantes. En ce sens, le prochain chapitre sera focalisé sur l'étude de la situation des ressources en eau de surface et souterraines dans les deux bassins versants étudié, en se basant sur une évaluation des potentiels hydriques et leurs évolutions au cours des années, et comment le climat et l'Homme ont-ils influencé cette évolution ?

CHAPITRE IV :

POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE : COMPORTEMENT, VARIATIONS, EXPLOITATION ET PERCEPTION

Sommaire

1. PRESENTATION DU POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE
2. TROIS NAPPES HYDROGEOLOGIQUES INFLUENCENT L'HYDROSYSTEME DES DEUX BASSINS VERSANTS
3. FLUCTUATION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE : INFLUENCE DES APPORTS PLUVIOMETRIQUES
4. CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES POUR LE STOCKAGE DES EAUX SOUTERRAINES
5. PRESENTATION DES SOURCES LOCALISEES DANS LES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES
6. HISTORIQUE DES MESURES DE DEBITS ET ETUDES DES SOURCES DANS LA ZONE D'ETUDE
7. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DES PRINCIPALES SOURCES DE LA ZONE D'ETUDE
8. COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES SOURCES DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIES
9. RELATION PLUIE-DEBIT DES SOURCES DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIE
10. PHENOMENE DE TURBIDITE DES EAUX DES SOURCES
11. EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU
12. PERCEPTION DES RIVERAINS ET VISITEURS VIS-A-VIS DU PAYSAGE HYDRAULIQUE

INTRODUCTION DU CHAPITRE

Dans toutes études hydrologiques, il est indispensable de quantifier les eaux de surface ainsi que souterraines, du fait que ces dernières constituent deux éléments souvent indissociables d'un même hydrosystème (Sophosleous, 2002). En effet, selon Castany (1965), les eaux de surface et les eaux souterraines présentent des relations et une indépendance hydrologique si étroites qu'en fait toutes deux constituent une ressource unique et que tout prélèvement sur les unes s'effectue au déterminent des autres.

Dans le cadre de cette thèse, après avoir présenté les facteurs déterminant l'hydrologie de surface des bassins versants des oueds Fès et Mikkès dans les trois premiers chapitres, à partir de l'analyse des caractéristiques physiographiques (chapitre 1), l'étude du facteur climatiques (chapitre 2) et la quantification des écoulements de surface (chapitre 3) ; ce dernier chapitre sera focalisé sur la contribution de l'hydrogéologie (nappes et sources) et l'influence du facteur anthropique (exploitation et usages) sur la détermination des caractéristiques de l'hydrosystème de la zone d'étude. En effet, ce quatrième chapitre est articulé en quatre grands volets, à savoir :

1. L'étude de la variation spatio-temporelle des nappes hydrogéologiques caractérisant la zone d'étude ;
2. L'analyse de l'échange entre les aquifères et les écoulements de surface via les sources ;
3. L'évaluation des aspects anthropiques en tant que facteur influençant le potentiel hydrique ;
4. Et enfin, l'étude de la perception de la population riveraine vis-à-vis des ressources en eau disponibles, en se basant sur le cas de la ville de Fès.

Le premier volet de ce chapitre sera composé de quatre axes. Tout d'abord une présentation du potentiel hydrogéologique de la zone d'étude en général (axe 1) et les nappes souterraines qui caractérisent la zone d'étude en particulier (axe 2), tout en essayant d'analyser la fluctuation de leurs niveaux piézométriques (axe 3) pour passer à la fin à un essai de modélisation en vue d'obtenir une représentation cartographique du potentiel des stockages des eaux souterraines (axe 4).

Le deuxième volet est destiné à l'étude des sources dans les deux bassins versants étudiés. Ce volet sera articulé en six axes, à savoir : une présentation des sources localisées dans les

bassins versants étudiés (axe 5) ; l'historique des études et mesures de leurs débits (axe 6) ; la présentation de leurs contextes hydrogéologiques (axe 7) ; l'analyse de leur comportement hydrologique (axe 8) ; la mise en évidence de la relation pluie-débit des sources (axe 9) et en enfin, l'étude du phénomène de turbidité qui affecte quelques sources de la zone d'étude, en se basant sur l'analyse de quelques événements de référence (axe 10).

Le troisième volet sera focalisé sur l'exploitation des ressources en eau dans les deux bassins versants étudiés (axe 11), en se basant sur l'eau d'irrigation et l'eau potable. En enfin, le dernier volet essaye d'approcher la perception de la population riveraine et/ou les visiteurs, vis-à-vis de la qualité du paysage des oueds traversant la ville de Fès comme exemple. Pour cette ambition, cette étude se base sur un questionnaire ciblant une population représentative au niveau de 5 sites dans la ville de Fès et son périphérie (axe 12).

1. Présentation du potentiel hydrogéologique de la zone d'étude

Nous rappelons que les bassins versants des oueds Fès et Mikkès font partie du bassin de Sebou, qui recèle environ 30 % du potentiel hydrique renouvelable du Maroc (PDAIRE, 2011). Vu la variabilité spatiale des formations géologiques et des apports pluviométriques, les deux bassins versants étudiés sont entourés de plusieurs nappes hydrogéologiques. Ces dernières représentent un ensemble d'étendues d'eaux souterraines allant de nappes phréatiques très discontinues et peu significatives jusqu'aux nappes profondes de grands potentiels hydriques. La figure 111 illustre les différentes nappes caractérisant les deux bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès.

Au Nord de la zone d'étude, le domaine prérfain est caractérisé par de petites nappes isolées (non-implantées dans la carte ci-dessous) utiles pour l'approvisionnement en eau pour les populations locales. A l'Est du plateau de Saïss, la nappe du couloir Fès-Taza présente un réservoir hydrique importante, dont la profondeur est de l'ordre de 30 m à 40 m. Cette nappe s'écoule du Sud-Est vers le Nord-Ouest et donne la résurgence de plusieurs sources à partir d'une alimentation assurée par l'infiltration des eaux de pluie. Les sources qui jaillissent de cette nappe présente un atout pour l'exploitation et l'utilisation des sources thermales, à l'image de la source de Sidi Hrazem au niveau de la limite orientale du bassin versant de l'oued Fès.

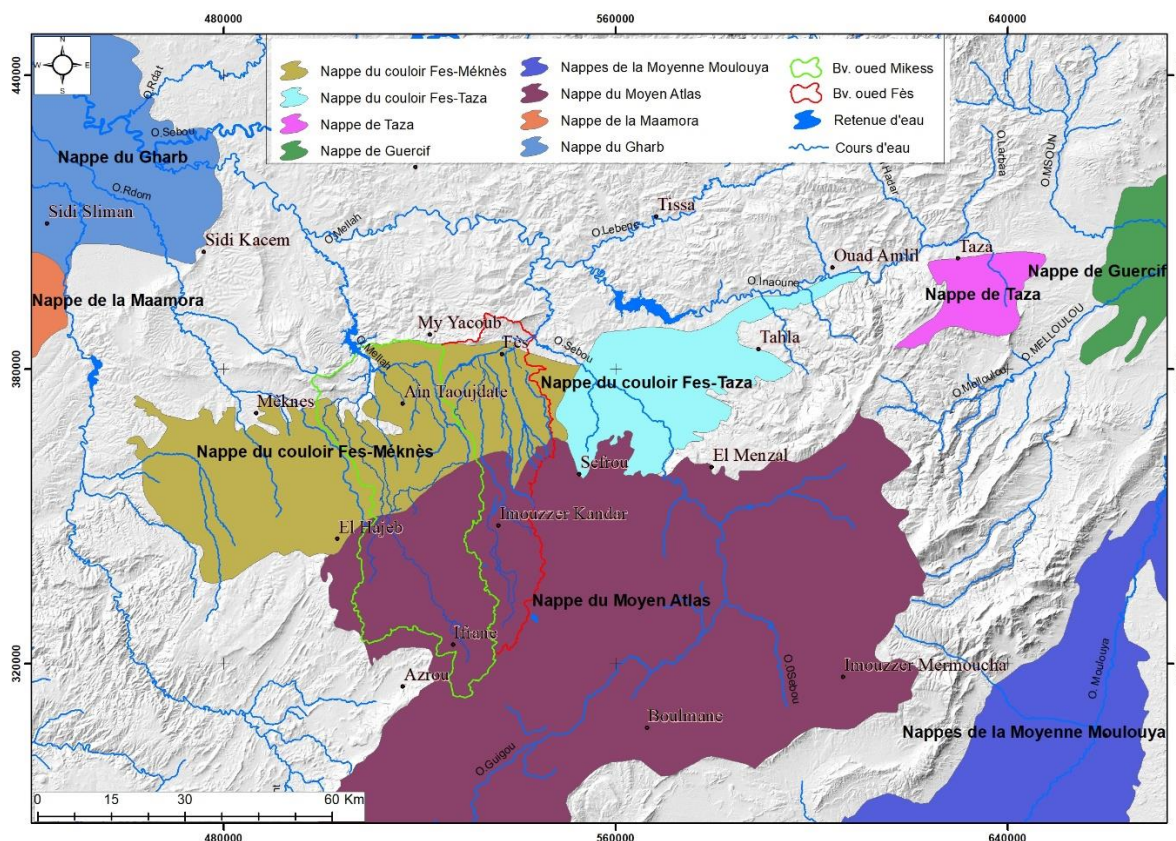


Figure 111: Les différentes nappes hydrogéologiques caractérisant la zone d'étude. (Source : ABHS)

Au niveau du plateau de Saïss, on assiste à une superposition de deux systèmes hydrogéologiques : une nappe profonde du Lias et un aquifère phréatique du Plio-Quaternaire. Au Sud, le causse Moyen Atlasique recèle une grande réserve hydrique souterraine. Elle est constituée d'abondantes nappes aquifères qui assurent un rôle important dans l'alimentation des cours d'eau du Moyen Atlas, comme la nappe de Tigrigra avec une superficie d'environ 200 km² issues des basaltes du Moyen Atlas.

2. Trois nappes hydrogéologiques influencent l'hydrosystème des deux bassins versants étudiés

Sur le plan hydrogéologique, les bassins versants des oueds Fès et Mikkès sont caractérisés par trois grandes nappes souterraines, à savoir :

- La nappe du causse d'El Hajeb-Ifrane ;
- La nappe profonde du Lias au niveau du plateau de Saïss ;
- Et enfin, la nappe phréatique libre du Plio-Quaternaire dans le Saïss.

Ces trois systèmes hydrogéologiques (Fig. 112) sont classés parmi les grands aquifères au niveau du Maroc et ont fait l'objet de plusieurs recherches depuis longtemps. Dès 1947, J.

Margat (1952) et Taltasse (1953) ont commencé une étude systématique du bassin de Fès-Meknès, ce qui a permis à Margat (1953) de publier la première carte hydrogéologique du bassin de Fès-Meknès d'une échelle de 1 : 100000. Par la suite, depuis 1958 à 1968 les chercheurs, Chapond (1960), Chamayou (1975), et Leclerc (1975) ont pu produire plusieurs données concernant les débits des sources issues du bassin de Saïss et des données hydrodynamiques liées aux fluctuations piézométriques. Ces données ont été exploitées afin d'établir un bilan général des ressources hydriques du bassin de Saïss. Ce bilan hydrique a été utilisé par plusieurs études, dont la plus connue est celle du travail du chercheur MacDonald (1990) qui a réalisé un modèle général de gestion des nappes du bassin de Saïss.

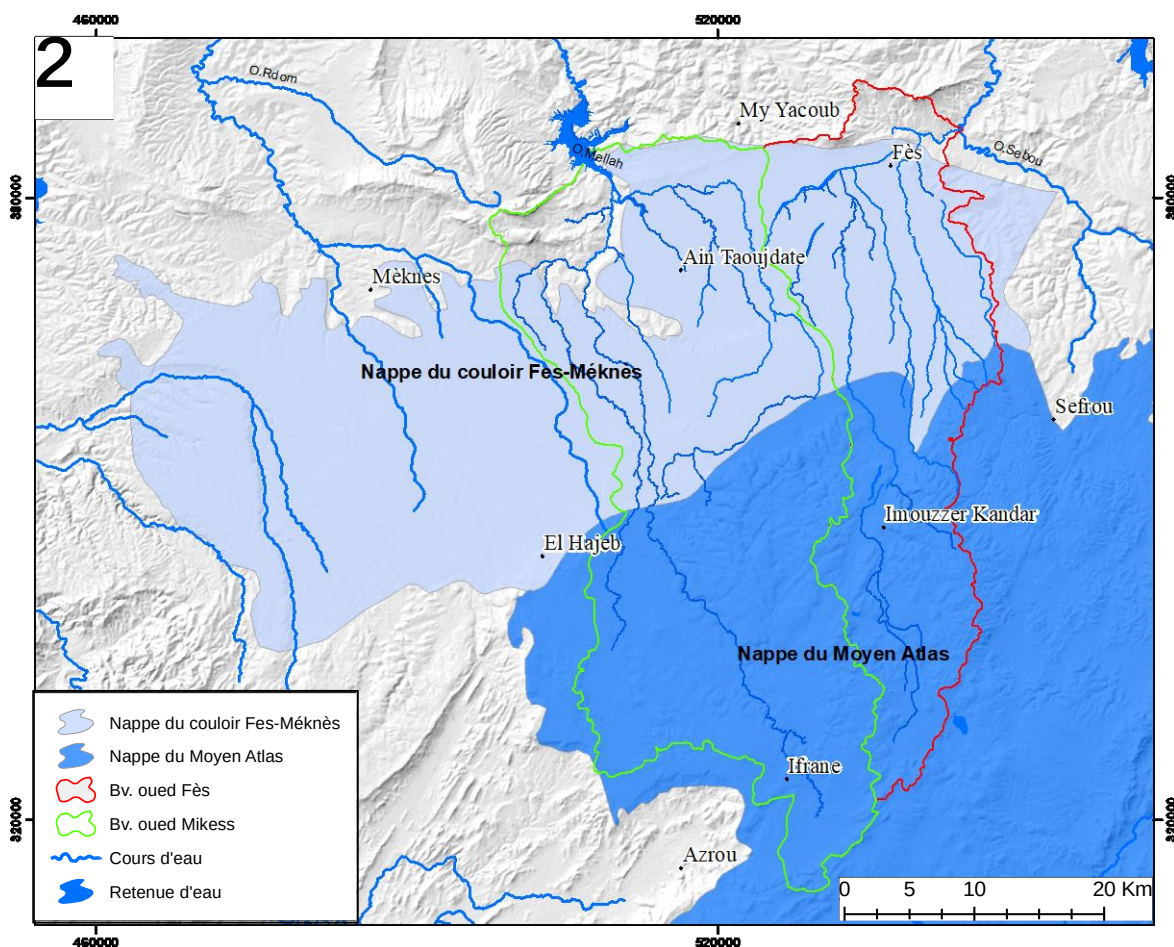


Figure 112: Extension des nappes de Saïss et du Moyen Atlas

Pour résumer les résultats de cette étude, on peut dire que le bassin de Saïss se comporte de deux nappes avec des formations lithologiques bien caractéristiques. Une nappe circule dans les formations lithologiques des sables fauves et les conglomérats du Plio-Quaternaire. Et une nappe profonde comprise des calcaires dolomitiques du lias. Mais, avant d'aborder ses

deux systèmes hydrogéologiques, on va commencer par l'amont, en se focalisant sur les nappes des Causses d'El Hajeb-Ifrane.

2.1 La Nappe du Causse d'El Hajeb-Ifrane

La partie du Causse moyen atlasique est caractérisée par une structure sub-tabulaire. Elle relève un substratum imperméable et isole totalement la partie du Causse D'Agourai du bassin d'Ifrane-El Hajeb. Les formations triasiques forment des couches imperméables sous les formations carbonatées de la surface ainsi que les argiles rouges qui sont souvent salifères et gypsifère, ce qui contribue à une circulation des eaux en leurs contacts (Martin, 1981).

Dans la partie où le Causse moyen atlasique se prolonge vers le plateau de Saïss, les failles et les flexures dans les formations du miocène et Plio-Quaternaire, favorisent une karstification très développée et constituent un important réservoir des eaux souterraines (Fassi, 1999) (Fig. 112). De ce fait, les eaux circulent dans des fissures de ses formations d'aquifères, dont la discontinuité des formations lithologiques favorise l'infiltration des eaux de pluie et de neige qui présentent la principale source d'alimentation de la nappe profonde du Lias.

La profondeur de la nappe du Causse D'El Hajeb est très variable. Selon le piézomètre N° 1575/22 qui se localise au centre du bassin d'El Hajeb-Ifrane, il varie entre 89 m et moins de 1 m du sol. Cet aquifère affleure par endroits au niveau des sources qui jalonnent les limites nord et ouest du bassin d'El Hajeb-Ifrane et au niveau de l'oued Tizguit.

La figure 113 illustre une coupe lithologique d'un forage de la région d'Ifrane, réalisé par l'agence du bassin hydraulique de Sebou (N° IRE 1684/22. X = 509755 et Y = 347250). La coupe

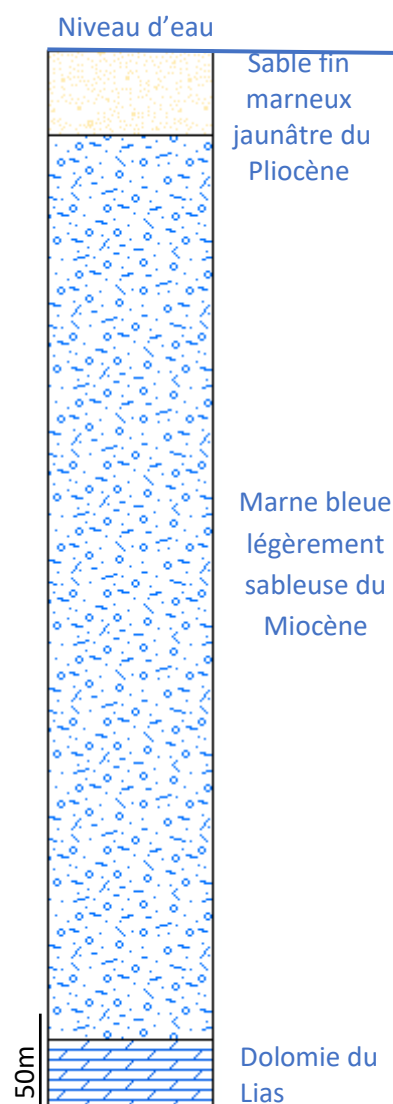


Figure 113: Coupe lithologique du forage N°IRE 1864/22 d'après la base de données des forages de l'ABHS, 2001 (X = 509755 et Y = 347250)

lithologique montre une série de formation dolomitique d'environ 120 m d'épaisseur et qui constitue des formations d'alternance dolomie et dolomie-sableuse. Cette situation hydrogéologie du Causse du Moyen Atlas favorise l'alimentation de la nappe profonde du Lias, qui jaillisse via plusieurs sources au niveau du piémont du Causse du Moyen Atlas, à savoir : le complexe des sources Ribaa-Bittit ainsi que les sources d'Ageumgeum, Atrous, Aïn Si Lmir et Aïn Sbaa. Toutes ses sources sont directement liées aux apports de la nappe phréatique et la nappe profond du Lias. Par ailleurs, d'autres sources jaillissent au niveau des basaltes de Plio-Quaternaire comme la source d'El Hijja. *(Ces sources seront présentées dans le 5^{ème} axe de ce chapitre)*

2.2 La nappe profonde du Lias au niveau du Plateau de Saïss

Dans le Plateau du Saïss, le potentiel hydrogéologique est présenté par un aquifère profond du lias. Cet aquifère couvre une superficie d'environ 3500 km² (ABHS). Elle circule dans les formations carbonatées du calcaire et dolomie du lias.

Concernant la structure géologique de cette aquifère, les formations liasiques sont très complexes dues à l'existence de plusieurs failles et flexures ainsi que des plissements qui ont engendré l'établissement de plusieurs unités structurales du Sud vers le Nord, dont le plateau de Saïss Fès, la plaine d'Ain Taoujdate et le plateau de Meknès (Taltasse, 1953).

L'alimentation de la nappe profonde du Lias se fait par les apports pluviométriques tombés dans le Moyen Atlas. Ces précipitations s'infiltrant au niveau des affleurements des calcaires des causses moyens atlasiques, avant de rejoindre le plateau de Saïss en aval. Cette recharge se fait sous les couches des marnes imperméables du miocène qui séparent la nappe captive du lias en profondeur de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire plus proche de la surface.

2.3 Nappe phréatique libre du Plio-Quaternaire du Saïss

Cette nappe phréatique présente un potentiel hydrique important. C'est un aquifère dont l'épaisseur moyenne est de l'ordre de 40 m. Sa superficie est estimée d'environ 2100 km², est se développe dans une lithologie assez variée (sables, marnes sableuses, grès, conglomérats, calcaires lacustres, marnes grises du Miocène) (Chamayou, et Al., 1975). Le substratum de la nappe phréatique est constitué des marnes de Miocène, avec une épaisseur pouvant atteindre environ 900 m (Fassi, 1999). Son écoulement circule du Causse du Moyen Atlas (SSO) vers les rides du préif (NNE).

L'alimentation de cette nappe Plio-Quaternaire est garantie grâce aux infiltrations directes des apports pluviométriques dans le plateau de Saïss ainsi que le Causse moyen atlasique. La recharge de cette nappe est aussi liée à l'abouchement direct avec une partie libre de la nappe profonde liasique ainsi que l'infiltration des eaux d'irrigations dans les différentes parties du plateau de Saïss (Bahir et Mennani, 2000). Dans ce contexte, le régime d'infiltration reste important dans la nappe phréatique. D'après le projet d'aménagement agricole (réalisé par l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou), le coefficient d'emménagement de la nappe phréatique varient entre 1.10^{-3} et $6,5.10^{-2}$. La valeur moyenne minimale est de $1,5.10^{-2}$, alors que la valeur moyenne maximale est de 3.10^{-2} (Amraoui, 2005). La vitesse d'infiltration d'eau varie d'une partie à l'autre, selon la perméabilité verticale des terrains dans le plateau de Saïss en général et dans les deux bassins versants étudiés en particulier.

Durant les dernières années, cette nappe a connu une grande décharge due à l'accélération des travaux de pompages des eaux potables et surtout celles destinées à l'irrigation. La figure 114 ci-dessous schématise les différents éléments de recharge et décharge de la nappe phréatique Plio-Quaternaire du Saïss.

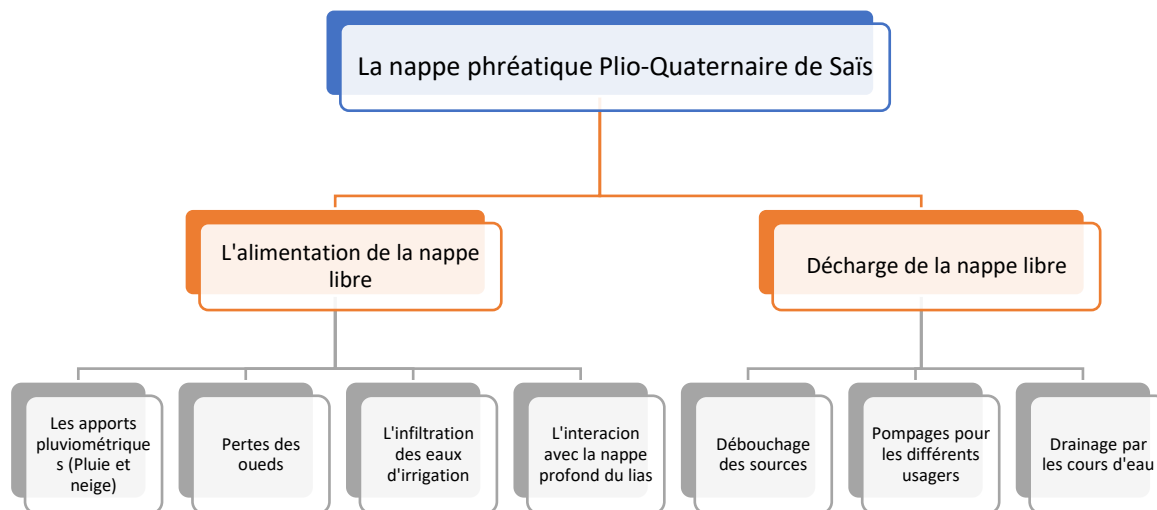


Figure 114: Les différents éléments d'alimentation et de décharge de la nappe phréatique du Saïss

3. Fluctuation du niveau piézométrique : influence des apports pluviométriques sur la nappe phréatique de Saïss

Faute de données, l'étude de la fluctuation du niveau piézométrique va se limiter sur la nappe phréatique du Saïss. Certes, les variations piézométriques de la nappe phréatique de Saïss sont fortement attachées à plusieurs facteurs anthropiques et physiques. En effet, il est

clair que l'Homme et ses activités ne peuvent que jouer un rôle négatif sur la variation des réserves hydriques souterraines. Durant les dernières années, la forte demande en eau à accélérer les travaux de pompage des ressources en eaux souterraines, afin de satisfaire les besoins des grandes agglomérations (Fès, Meknès) et centres urbains (Ain Taoujdat, Sbaa Ayoun, My Yakoub...) en eau potable, ainsi que les grandes exploitations agricoles en eau d'irrigation. Cela a bien évidemment exposé le niveau piézométrique de la nappe phréatique de Saïss à un grand abaissement.

Par ailleurs, le facteur physique est principalement lié à la variation spatiotemporelle des apports pluviométriques. Le niveau piézométrique de la nappe phréatique de Saïss a toujours été influencé par la quantité des précipitations. En effet, les années les plus sèches (années 80) sont marquées par une grande chute du niveau piézométrique de la nappe phréatique du Saïss. Après les années humides de 2009 et 2010, le niveau de cette nappe a augmenté de plusieurs mètres (Fig.115).

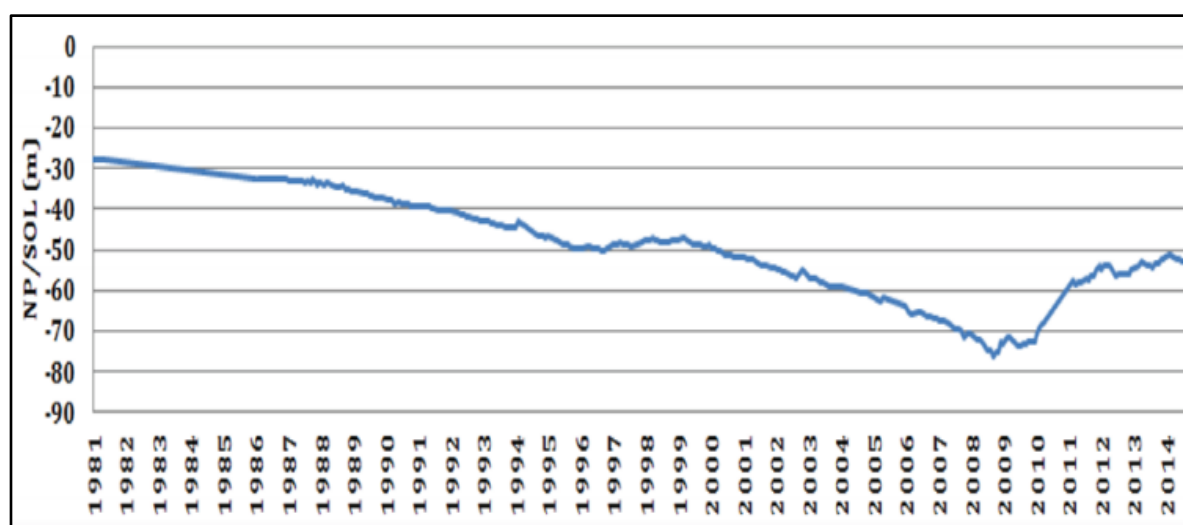


Figure 115: Abaissement du niveau piézométrique de la nappe phréatique du Saïss entre 1981 et 2014 selon le piézomètre 2366/15. (Laraichi et al, 2017)

Pour bien comprendre les changements hydrodynamiques de la nappe phréatique étudiée durant les dernières décennies et l'impact des apports pluviométriques sur la variation piézométrique de la nappe, une investigation spatiotemporelle sera réalisée, afin de caractériser l'évolution des fluctuations des réserves hydriques souterraines de Saïss.

3.1 Evolution du niveau piézométrique de la nappe de Saïss

Pour analyser l'évolution du niveau piézométrique de la nappe phréatique de Saïss, on s'est basé sur les données des forages disponibles au niveau de la zone d'étude. Grâce aux résultats de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, on a pu cartographier l'évolution du niveau piézométrique du Saïss entre février 1985 et février-mars 2005.

D'après les figures 116 et 117 ci-dessous, on peut voir clairement que le niveau piézométrique s'est abaissé d'une façon remarquable dans différentes parties du plateau de Saïss. Aussi, on peut voir que le sens d'écoulement souterrain a gardé le même sens, mais avec quelques changements surtout au niveau du piémont du causse d'El Hajeb. En ce qui concerne le gradient hydraulique ; il est constant au niveau de la zone de Douiyet et perturbé au niveau de la plaine d'Ain Taoujdate. Dans le dir du Causse d'Imouzzar Kenddar, le gradient hydraulique est plus élevé par rapport aux autres zones du plateau de Saïss. Par ailleurs, il faut mentionner que la flexure d'Ain Taoujdate présente une ligne de partage des eaux souterraines qualifiant une direction des écoulements Sud-Ouest et Nord-Est. En enfin, les rides prérfaines constituent des limites imperméables ce qui engendre un sens d'écoulement vers l'Ouest.

Plus récemment, entre 2006 et 2016, les niveaux piézométriques relevés dans 8 forages au niveau du Saïss montrent que la nappe phréatique de Saïss s'est rétablie. Le niveau piézométrique est passé de 30 m/sol en 2006 à 15 m/sol au niveau du piézomètre 1314/22. Il est même très proche de la surface au niveau des piézomètres 2607/15 et 2605/15. (Fig. 117). L'analyse de l'impact de la pluviométrie sur la nappe phréatique de Saïss, fera l'objet du sous-axe ci-dessous.

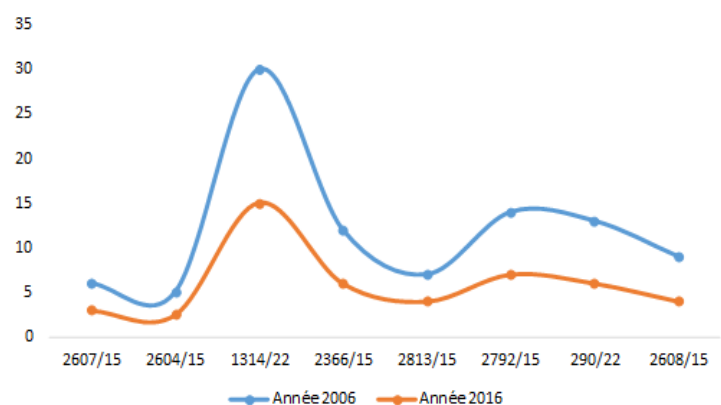


Figure 116: Evolution piézométrique de la nappe de Saïss entre 2006 et 2016

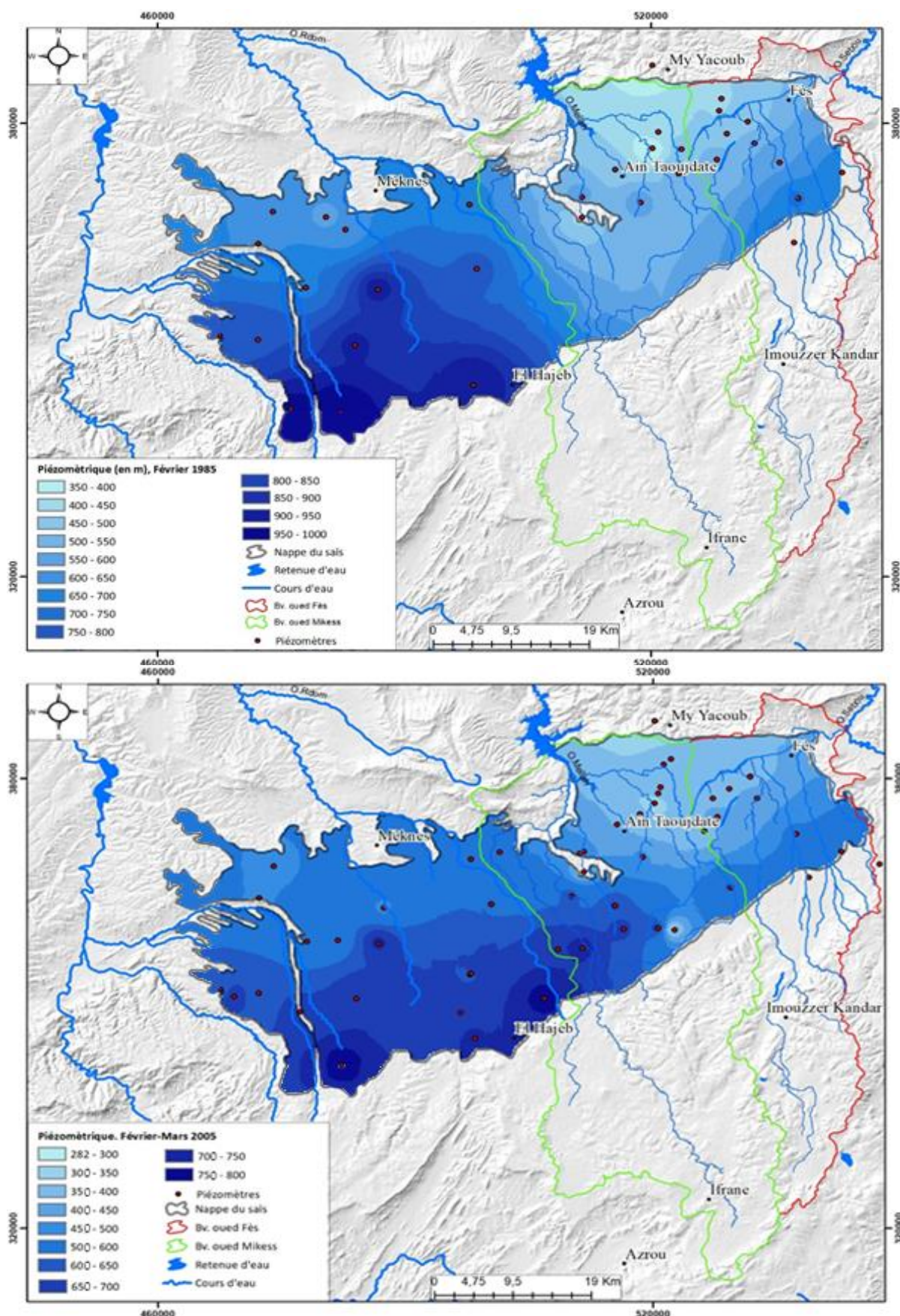


Figure 117: Evolution du niveau piézométrique (en m) entre février 1985 et février-mars 2005 (Données de l'ABHS).

3.2 Analyse de la relation entre le niveau piézométrique avec les apports pluviométriques

Les fluctuations saisonnières et annuelles de la nappe phréatique de Saïss sont importantes dans les différentes parties de la zone étudiée. Cette variation est principalement liée aux éventuelles modifications de la recharge via les apports pluviométriques caractérisant _à la fois_ les causses du Moyen Atlas et le plateau du Saïss. Comme il a été déjà montré dans le deuxième chapitre de cette thèse, la variabilité pluviométrique des deux bassins versants limitrophes, montre une alternance entre des périodes humides, normales et sèches. Alors, quels sont les impacts de ces tendances pluviométriques sur la variation du niveau piézométrique de la nappe phréatique de Saïss ? Pour répondre à cette question et comprendre la relation entre la variation du niveau piézométrique de la nappe phréatique de Saïss, avec les apports pluviométriques caractérisant la zone d'étude en général (amont et aval) ; il est indispensable d'analyser ces deux paramètres via des fonctions statistiques. Dans cette optique, cette étude est basée sur le calcul des coefficients de détermination des niveaux d'eau de la nappe phréatique de Saïss (via trois piézomètres représentatifs) avec les apports pluviométriques des stations météorologiques de Fès-Saïss (en aval) et d'Ifrane (en amont) (Fig.118, 119, 120, 121, 122 et 123).

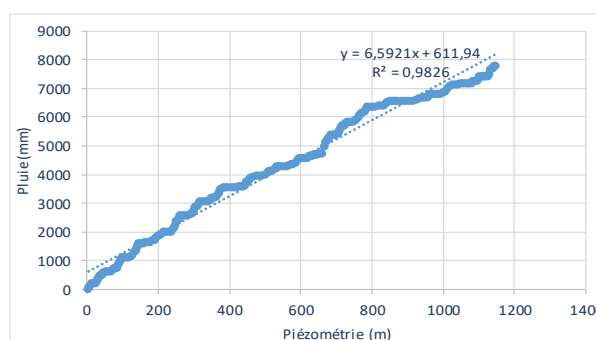


Figure 118: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2279 avec la station de Fès-Saïss

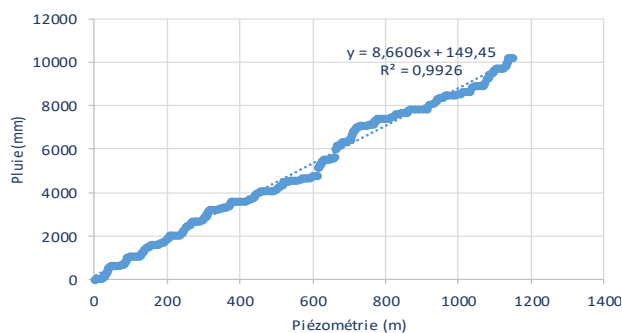


Figure 119: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2279 avec la station d'Ifrane

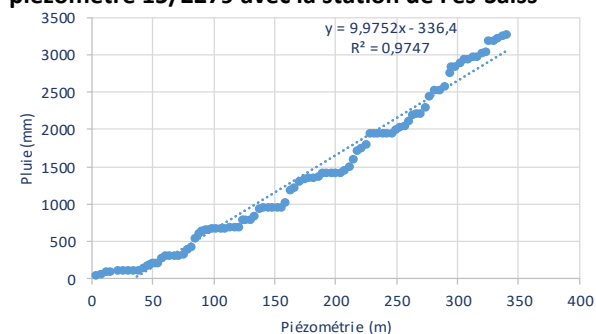


Figure 120: Coefficient de détermination du piézomètre 15/1179 avec la station de Fès-Saïss

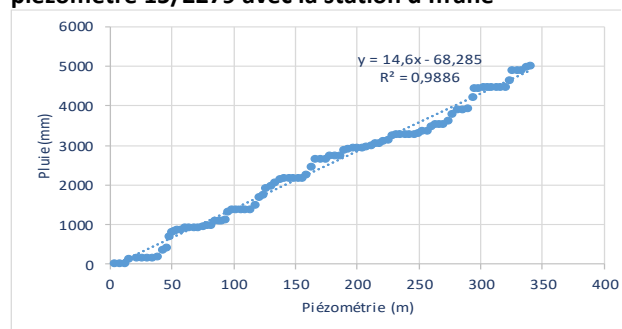


Figure 121: Coefficient de détermination du piézomètre 15/1179 avec la station d'Ifrane

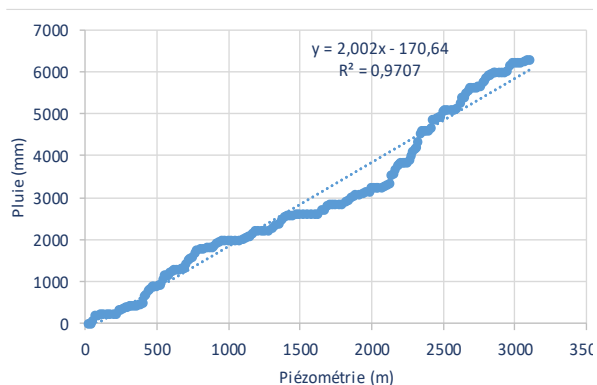


Figure 122: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2813 avec la station de Fès-Saïss

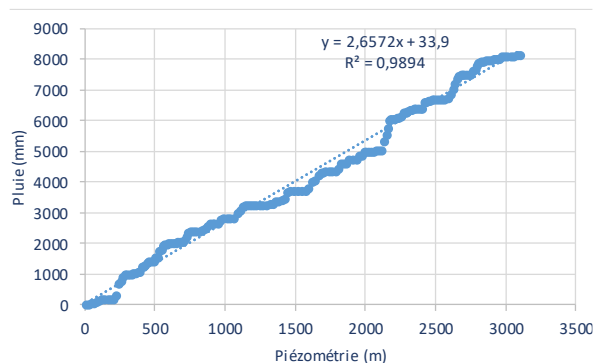


Figure 123: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2813 avec la station d'Ifrane

Le tableau 35 ci-dessous présente les coefficients de détermination des trois points piézométriques avec les apports pluviométriques enregistrés dans les stations de Fès et Ifrane. D'après ces résultats, le coefficient de détermination est très proche à 1, ce qui signifie une très forte corrélation entre la fluctuation des apports pluviométriques et le niveau piézométrique de la nappe phréatique de Saïss. Cependant, il faut signaler que la corrélation avec la station d'Ifrane est plus importante par rapport à Fès. De ce fait, on peut dire que, malgré que le Moyen Atlas soit un peu loin de la nappe phréatique de Saïss, les précipitations qu'il reçoit, influencent directement le niveau piézométrique de la nappe de Saïss ; que ce soit via les débits des oueds qui coulent vers l'aval ou bien à partir des écoulements souterrains qui participent directement à la recharge de cette nappe libre.

Piézomètres (Indice/ Ordre)	X	Y	Z	R²/ avec Station de Fès	R²/ avec Station d'Ifrane
15/2279	528300	381680	377	0,98	0,99
15/1179	531750	380250	383	0,97	0,98
15/2813	520600	378000	395	0,97	0,98

Tableau 36: Coefficient de détermination des piézomètres avec les stations de Fès-Saïss et Ifrane

Donc, les résultats du tableau ci-dessus montrent une très forte corrélation entre la pluie et la piézométrie de la nappe étudiée. Pour illustrer cette corrélation, la figure 124 ci-dessous présente un alignement de l'évolution mensuelle du niveau piézométrique au niveau du domaine de Ras El Ma en aval du bassin versant de l'oued Fès (Piézomètre 15/2253, z=380m) et les précipitations mensuelles des deux stations représentatives (Fès et Ifrane) entre 1989 et 2011. La première lecture de cette figure, montre qu'il y a influence directe des apports pluviométriques sur le niveau de la nappe phréatique de Saïss. A titre d'exemple, on peut

remarquer que durant les années humides 2009, 2010 et 2011, le niveau piézométrique de nappe de Saïss a augmenté de plusieurs mètres par rapport aux périodes sèches des années 1990 et 2000 (à l'exception de l'année humide de 1996). Au niveau du fond de la vallée de l'oued Fès amont, cette nappe a affleuré à la surface pendant plusieurs semaines durant les années humides de 2009, 2010 et 2013 (Photo 71).

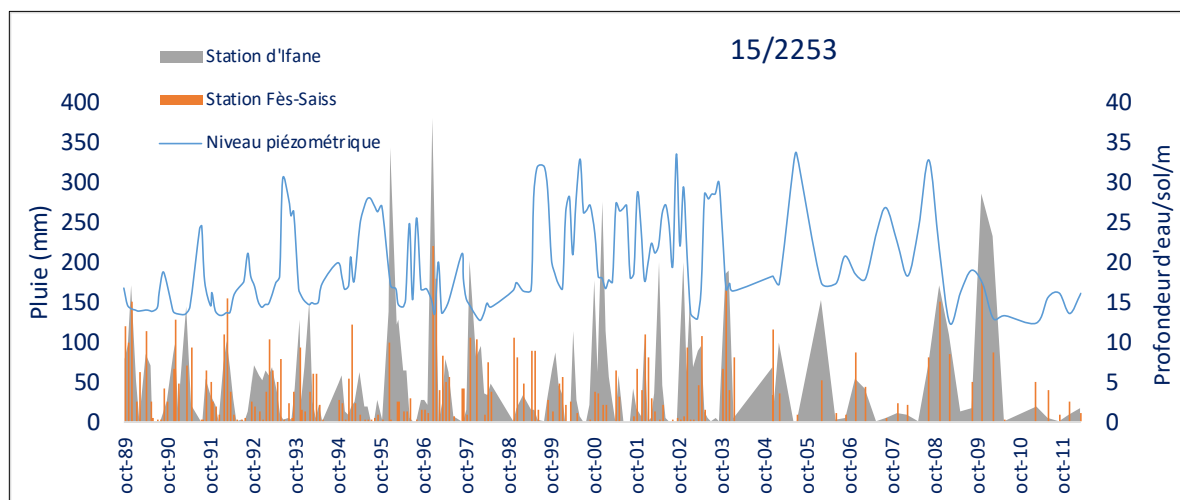


Figure 124: Niveau piézométrique (15/2253) par rapport aux pluies mensuelles des stations de Fès-Saïss et d'Ifrane



Photo 71: Affleurement de la nappe phréatique de Saïss au niveau de la vallée de l'oued Fès. (Cliché de LASRI M., Mars 2010)

En outre, sur une échelle temporelle plus courte et plus récente, le piézomètre 15/3321 (655 m) (Fig. 125) au niveau de la zone Ain Cheggag offre de conclusions intéressantes entre 2008 et 2015. Durant cette période, la nappe phréatique de Saïss a connu une augmentation jusqu'en 2014. Les années humides 2009 et 2010 ont favorisé la remonté du niveau piézométrique de plusieurs mètres, jusqu'elle est arrivé à 15 mètres de la surface. Par la suit,

cette nappe a connu quelques petites oscillations en 2013 et 2014, pour redescendre encore une fois en 2015 à cause de la pénurie des précipitations.

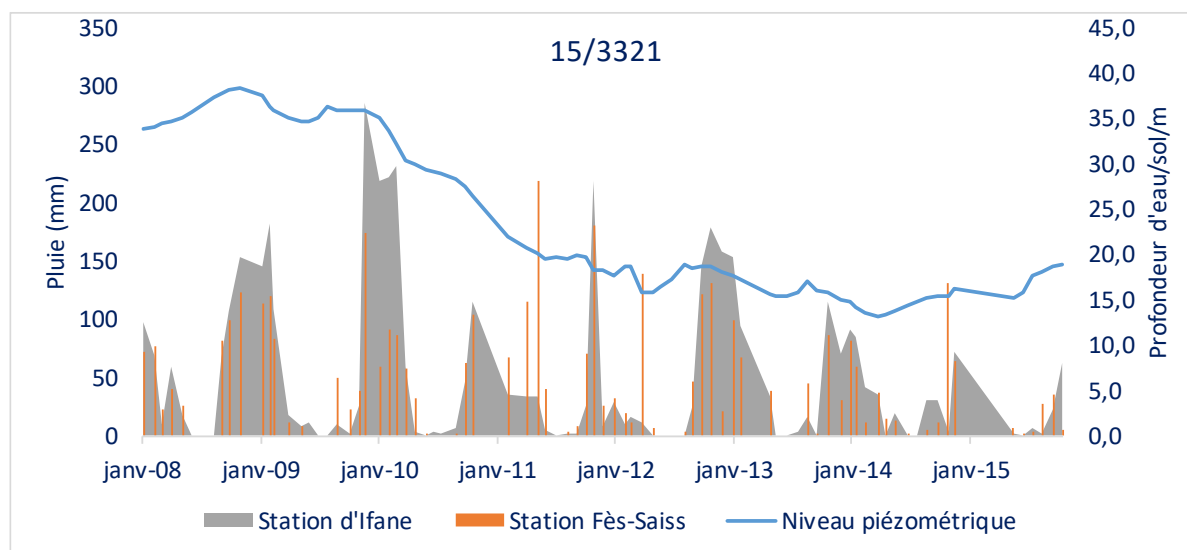


Figure 125: Niveau piézométrique (15/3321) par rapport aux pluies mensuelles des stations de Fès-Saïss et d'Ifrane

Le troisième piézomètre est localisé dans la région de M'Haya (15/1813), au niveau du bassin versant de l'oued Mikkès. Ce piézomètre affiche une grande perturbation du niveau piézométrique de la nappe phréatique dans ce périmètre (Fig. 126). Mais, ce qu'il faut mentionner, c'est que cette nappe n'est pas trop influencée par les apports pluviométriques, contrairement aux deux premiers points, situés au niveau du bassin versant de l'oued Fès. Cela est expliqué par le rythme de la recharge, lui-même influencé par la géologie et la lithologie de chaque zone, sans oublier le facteur anthropique qui peut basculer cette analyse à cause du pompage.

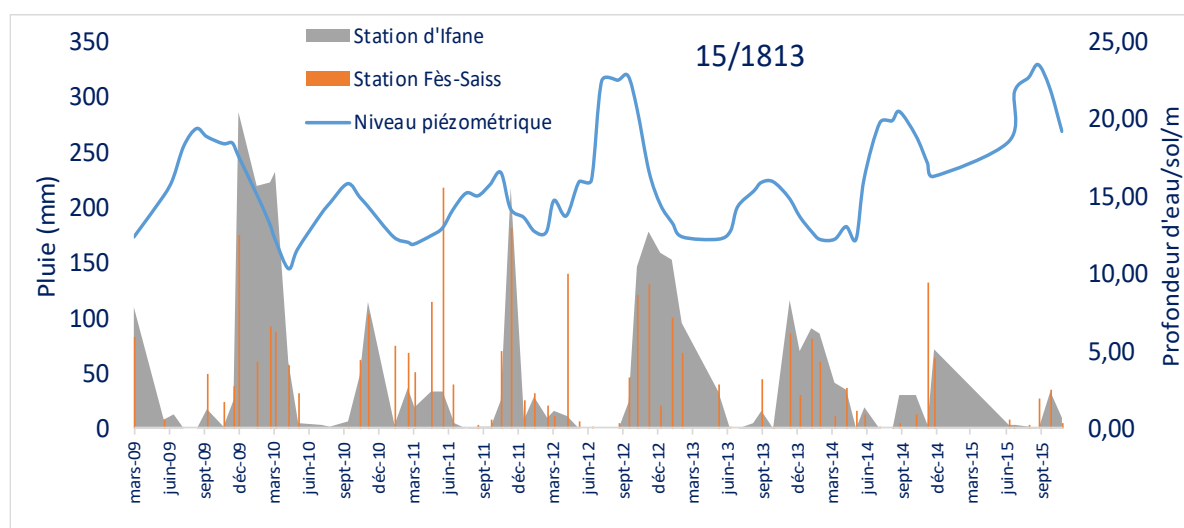


Figure 126: Niveau piézométrique (15/1813) par rapport aux pluies mensuelles des stations de Fès-Saïss et d'Ifrane

En conclusion, d'après l'analyse de la relation entre les apports pluviométriques enregistrés dans les deux stations de Fès Saïss et d'Ifrane et les niveaux piézométriques relevés dans différents points du plateau de Saïss, plusieurs conclusions peuvent être relevées :

- Une baisse significative a été remarquée à partir les années 1980 au niveau des différents points piézométriques de Saïss ;
- Une remontée remarquable du niveau piézométrique lors des années humides exceptionnelles 2009, 2010 et 2013 ;
- L'influence de la pluviométrie est très claire et visible à l'échelle intra-annuelle ;
- Le rythme de la recharge de la nappe phréatique de Saïss est variable d'une zone à l'autre. Alors comment peut-on définir les zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines ?

4. Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines

Plusieurs facteurs déterminent la capacité d'emménagement des eaux souterraines dans la zone d'étude. L'objectif principal de cet axe est de délimiter les zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines en se basant sur la méthodologie présentée ci-dessous.

4.1 Méthodologie

De nombreux facteurs majeurs influent l'emménagement et la circulation des eaux souterraines, à savoir : la topographie, la lithologie, les structures géologiques, la profondeur de l'altération, l'étendue des fractures, la porosité primaire, la porosité secondaire, la pente, les régimes de drainage, la forme du relief, l'utilisation des terres, la couverture terrestre et le climat. A l'aide d'un modèle empirique sur ArcGIS®, nous allons essayer d'effectuer une investigation spatiale en se basant sur les différents facteurs mentionnés ci-dessus.

Ce modèle permet d'identifier les différentes zones favorables au stockage des eaux souterraines. Les différents paramètres qui sont utilisés dans ce modèle sont : la lithologie, la carte de linéament, la densité de drainage, la pente et les précipitations. La figure ci-dessous illustre la démarche adoptée dans cette méthodologie (Fig. 127).

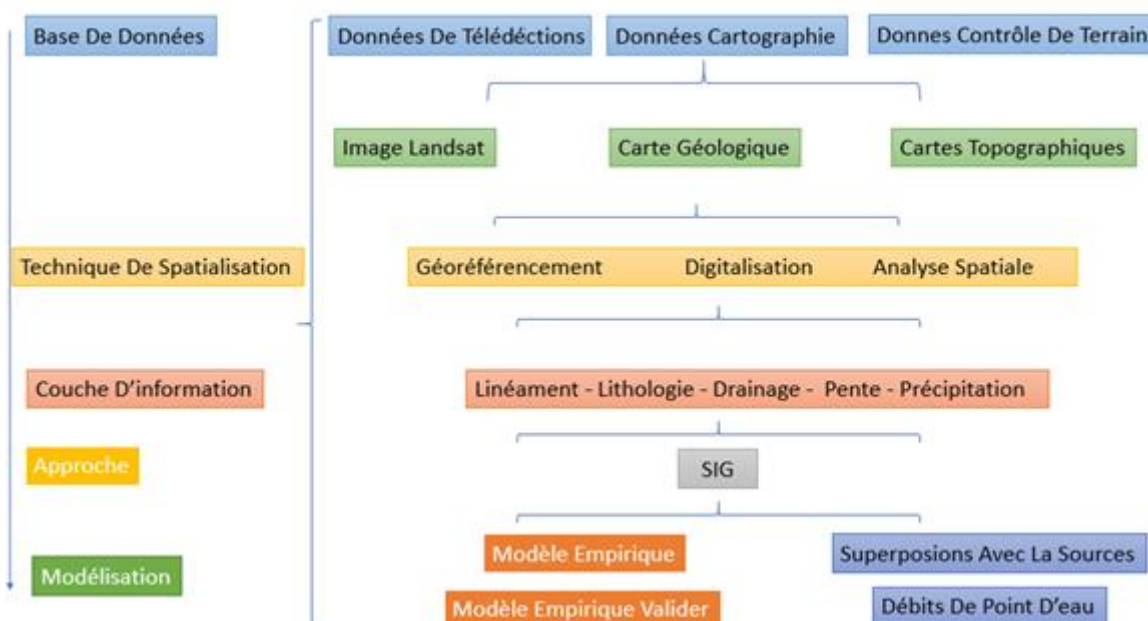


Figure 127: Méthodologie adoptée pour le modèle empirique

Cette méthodologie de cartographie du potentiel en eau souterraine, commence par l'identification des couches thématiques utilisées pour évaluer la recharge potentielle de l'aquifère de la zone d'étude. Ces données ont été élaborées à partir de nombreuses sources d'information, telles que les cartes topographiques, géomorphologiques, géologiques, hydrogéologiques ainsi que les données des stations et postes pluviométriques. La méthode d'évaluation de la recharge des aquifères est basée, dans un premier temps, sur la spatialisation des apports pluviométriques. Cette représentation spatiale des zones pluviométriques est obtenue à partir de la carte d'interpolation de données pluviométriques recueillies à partir des 18 stations pluviométriques couvrant les deux bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès (*chapitre 2*). Dans un deuxième temps, les aspects de l'infiltration sont approchés à partir des données géologiques et topographiques déterminant la perméabilité des terrains.

4.2 Résultats

La cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès est élaborée grâce à la méthode de « superposition pondérée » à l'aide de l'outil de *l'analyse spatiale* sous ArcGIS®. Cette méthode consiste à classifier les paramètres individuels de chaque couche thématique, en attribuant des coefficients de pondération en fonction de l'influence de chaque facteur. Cette opération

permet de différencier les capacités de stockage des eaux souterraines dans les deux bassins versants étudiés (Fig. 128).

Les résultats obtenus dans la carte ci-dessus reflètent les différents paramètres impliqués dans le modèle empirique utilisé pour cet objectif. Comme prévu, cette modélisation empirique, montre que la capacité de stockage des eaux souterraines varie entre l'amont et l'aval. Du fait qu'il est le plus arrosé et grâce à sa lithologie très perméable, le Moyen Atlas est une zone de stockage des eaux souterraines par excellence. Le plateau de Saïss, quant à lui, présente une zone à faible capacité stockage des eaux souterraines.

Ces résultats peuvent

servir pour la planification de futurs projets de recharge artificielle dans la zone d'étude, afin d'assurer une utilisation durable de l'eau souterraine. Cette dernière influence très profondément l'hydrosystème des deux bassins versants étudiés, du fait, quelle est à l'origine

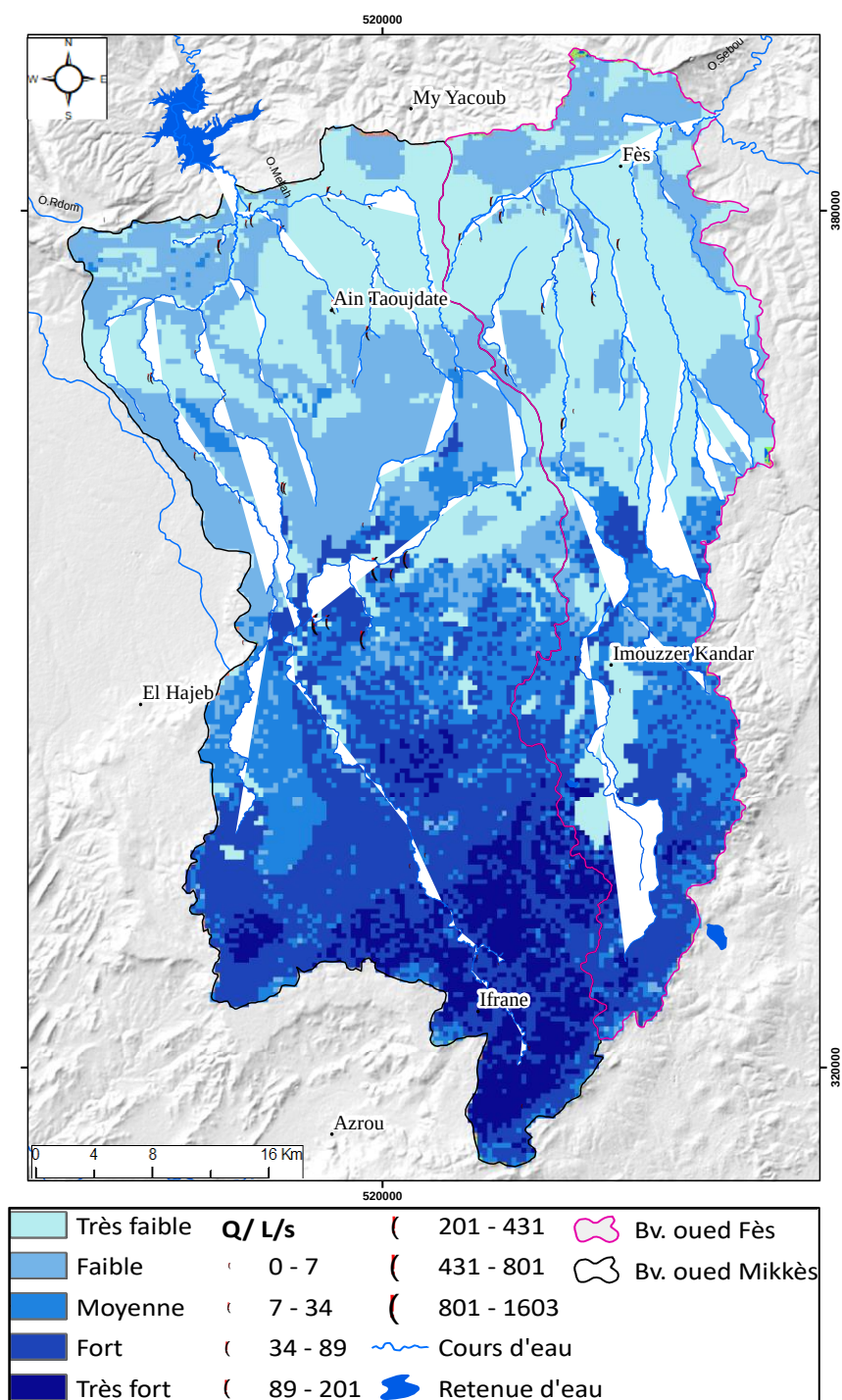


Figure 128: Les zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines

de toutes les sources implantées dans la zone d'étude. Ces sources feront l'objet des cinq prochains axes de ce chapitre.

5. Présentation des sources localisées dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès

Comme il a été mentionné dans le premier chapitre, les deux bassins versants étudiés s'inscrivent dans trois unités structurales différentes. Cette complexité géologique est à l'origine des résurgences de plusieurs sources de différents types. L'émergence de ces dernières est liée aux nappes hydrogéologiques déjà présentées ci-dessus. Selon un critère quantitatif (débits), on peut classer ces sources en deux types : de grandes sources et des sources aux faibles débits. Ces dernières se caractérisent par un débit qui ne dépasse pas 20 L/s (une centaine de sources), tandis que les grandes sources peuvent produire parfois un débit supérieur à 1500 L/s (une dizaine de sources). Mais selon une classification hydrogéologique, Imbeaux (1930) et Schoeller (1962) ont différencié entre :

1. Des sources d'exutoires de la nappe libre qui contiennent trois types de sources :

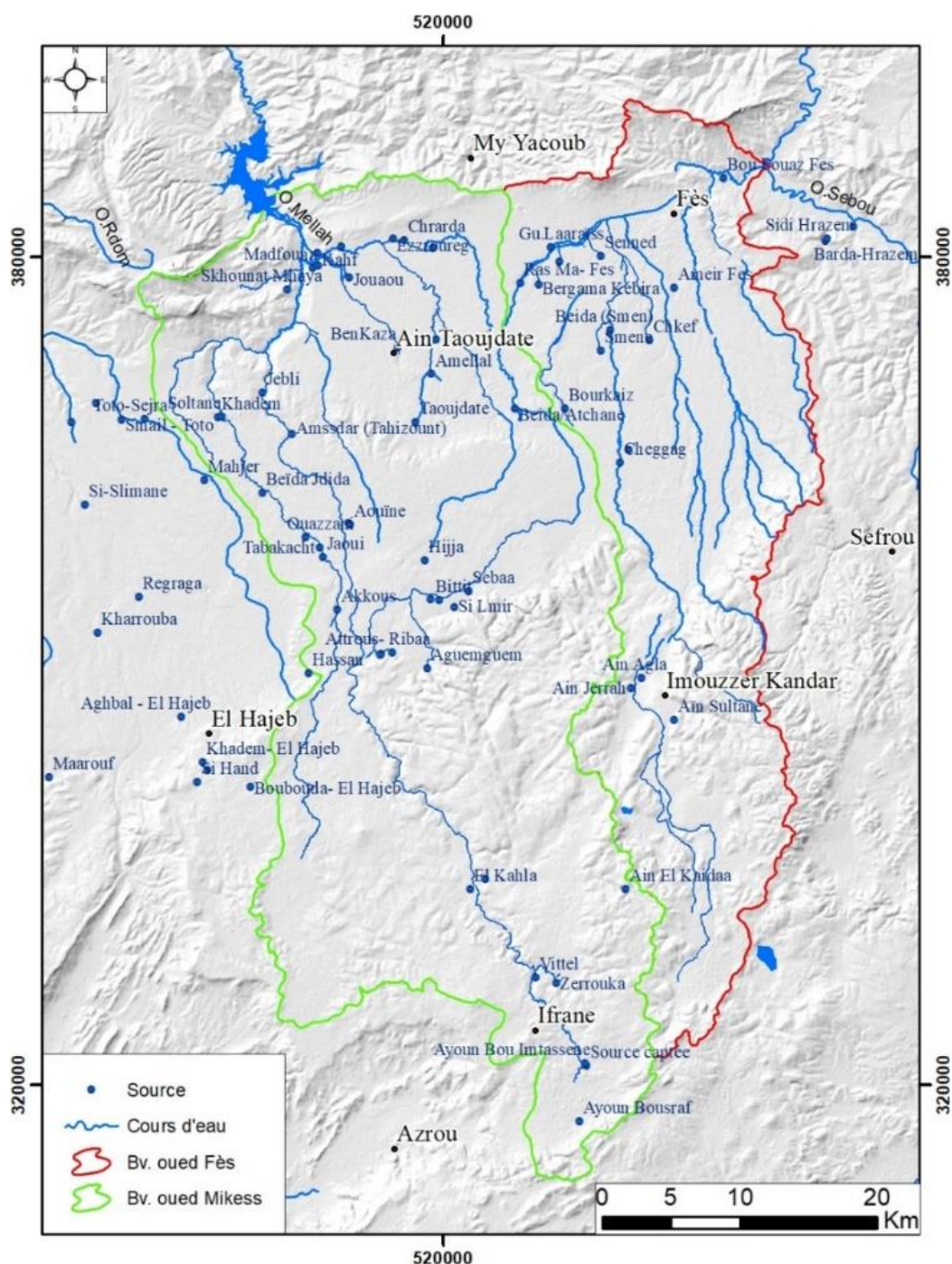
- **Les sources d'émergence** qui résultent à partir d'une interaction de la surface piézométrique entre la nappe et la surface du sol.
- **Les sources de déversement** au contact ou proches d'un mur imperméable causant l'affleurement de l'aquifère.
- **Les sources de débordement** qui sont toujours au contact du toit imperméable affleurant au niveau d'aquifère, ou d'un imperméable latéral (Amraoui, 2005 ; Belhassan, 2011). Elles sont au contact avec la nappe profonde du Lias.

2. Le deuxième type sont les sources liées aux failles ou bien à travers d'un toit imperméable. Le tableau 36 ci-après récapitule les différentes sources, implantées dans la figure 129 ci-dessous.

Source/ Aïn	Coord_X	Coord_Y	Altitude
Sidi Allal Dfel	510900	380250	271
Bou Fouaz Fès	540310	385690	276
Madfouna	510550	379150	293
Kahf	511000	379350	309
Skhounat Mhaya	508750	377600	313
Boutouahene	512650	380700	341

Jouaou	513200	378500	351
Ezzroureg	516400	381300	369
Chrarda	517200	381200	372
Boukhnafer	519250	380600	373
Gulaaraïss	527800	380650	376
Ras Ma Fès	525600	378100	380
Senned	531400	380040	382
Bergama Sghira	528450	379650	390
Bergama Kbira	526950	377980	396
Ben Kazza	516750	373400	401
Ghara	519500	374000	412
Ameir Fès	536690	377700	432
Amellal	519150	371500	439
Jebli	506950	370100	469
Beida (Smen)	532100	374650	471
Smen	531400	373200	473
Chkef	534950	373950	479
Beida/Atchane	525200	368950	513
Bourkaiz	528850	368950	522
Taoujdate	518000	368000	526
Sultane	504000	368400	530
Khadem	503700	368350	543
Amssdar (Tahizount)	509050	367150	593
Affehame	533450	365980	626
Beïda Jdida	506950	362900	633
Cheggag	532830	365050	636
Ouazzani	510050	359650	692
Sidi Chafi	513150	360700	699
Aouïne	513300	360570	706
Tabakacht	511100	358900	711
Hijja	518700	358000	715
Jaoui	511300	358200	724
Sebaa	521850	355750	743
Si Lmir	520800	354600	753
Bittit	519750	355100	761
Akkous	512380	354380	792
Bittit non captée	519069	355150	802
Ribaa Aval	515450	351100	871
Ribaa Amont	515550	351190	872
Hassan	510300	349800	880
Attrous- Ribaa	516350	351280	883
Aguemguem	518840	350120	912
Ain Agla	534359	349445	1170
Ain Jerrah	533590	348702	1182
El Maach	523050	334874	1351

El Kahla	521978	334136	1386
Ain Sultane	536744	346430	1431
Vittel	526715	327737	1591
Zerrouka	528213	327362	1611
Ain El Kaidaa	533206	334123	1629
Ayoun Bou Imtassene	530279	321552	1695
Ayoun Bousraf	529861	317314	1723

Tableau 37: Sources localisées dans les deux bassins versants étudiés**Figure 129: Localisation des sources dans les deux bassins versants étudiés**

6. Historique des mesures de débits et études des sources dans la zone d'étude

Grâce aux grands potentiels hydriques des sources dans la zone d'étude, les mesures des débits ont débuté en 1934, d'une façon discontinue, en trois grandes périodes (Amraoui, 2005) :

1. La première période s'est étalée entre 1934 et 1957. Elle a été caractérisée par des mesures périodiques qui ne dépassent pas deux mesures par mois, en appliquant la formule de Rhebock, 1929 qui correspond à des mesures de débits en fonction des parois minces (Jaugeage par déversoir, présenté dans le chapitre 3).
2. Dix ans après, entre 1967 et 1972, les mesures de débits ont été réalisées via les moulinets hydrométriques.
3. La troisième période correspond aux années quatre-vingt-dix, avec 2 à 3 mesures par mois à l'aide d'un micromoulinet ainsi que des mesures par déversoir, installés et utilisés lors des premières périodes de mesures de débits.

L'un des premiers rapports concernant les sources du plateau de Saïss a été réalisé entre 1974 et 1984 par la Direction Générale de l'Hydraulique. Amraoui (2005) a signalé qu'elle est parmi les études hydrologiques les plus riches en informations. En ce qui concerne le Moyen Atlas, en 1989, une étude s'est intéressée à l'infiltration des eaux au niveau Causses Moyen Atlasique via l'application d'un modèle global à réservoir (modèle GARDENIA du BRGM) (Benjbara et Rhaouti, 1989). Ce rapport constitue une référence de l'hydrogéologie de cet espace géographique. Par ailleurs, après la création de l'Agence du bassin hydraulique de Sebou (ABHS) plusieurs stations hydrométriques ont été installées, notamment sur les principales sources.

Sur le plan académique, ces sources ont fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques, à savoir : Normand, 1984 ; Mezzine M. 1998 ; Tarik M. 2003 ; Elouazzani A. 2004, Amraoui F. 2005 ; Belhassan K. 2011 ; Amyay M. 2013 ; Obda Kh. 2017 et Brett A. 2019. En 2004, Elouazzani a produit de résultats pertinents concernant la connaissance hydrogéologique des sources Ribaa et Bittit. Cette étude a mis en évidence le comportement hydrologique de ces deux sources face aux sollicitations au niveau Causse Moyen Atlasique. Ce comportement est lié à un l'écoulement souterrain qui implique l'existence d'un drainage de type transitif. Par la suite, Amraoui (2005), a publié une autre recherche sur la connaissance des aquifères

karstiques du plateau de Saïss et sa bordure moyenne atlasique. En 2011, Belhassan a étudié la situation hydrologique des sources au niveau du bassin versant de l'oued Mikkès. Cette étude a mis l'accent sur le tarissement de ces sources durant les périodes de sécheresses. Dans le même domaine, Amyay et al ont démontré en 2013 que « *Les écoulements de surfaces générés par les épisodes pluvieux se chargent en produits d'érosion, s'infiltrant et s'engouffrent dans des cavités karstiques puis s'acheminent vers la source de Bittit à travers un réseau de conduits souterrains* ». Ces évènements liés aux phénomènes de turbidités seront étudiés dans le prochain axe concernant le comportement hydrologique des sources. Plus récemment, Obda et al., (2017) ont souligné que les débits des sources en question ont diminué sous l'effet de la surexploitation des réservoirs souterrains en amont ainsi que les différents aménagements urbains et/ou hydro-agricoles en aval.

Pour compléter ces résultats, nous avons réalisé plusieurs campagnes de jaugeages concernant ces sources entre 2014 et 2018. Les résultats obtenus seront analysés dans les axes qui suivent.

7. Contexte hydrogéologique des principales sources de la zone d'étude

Il y a une relation intrinsèque entre la structure des aquifères, le drainage souterrain, le degré de karstification et la réponse hydrologique des sources (Mangin, 1984). La majorité des sources caractérisant les deux bassins versants étudiés, sont à l'origine de l'infiltration des eaux de surface. Ce régime d'infiltration est conditionné par plusieurs facteurs et paramètres résumés dans le schéma ci-dessous (Fig. 130).

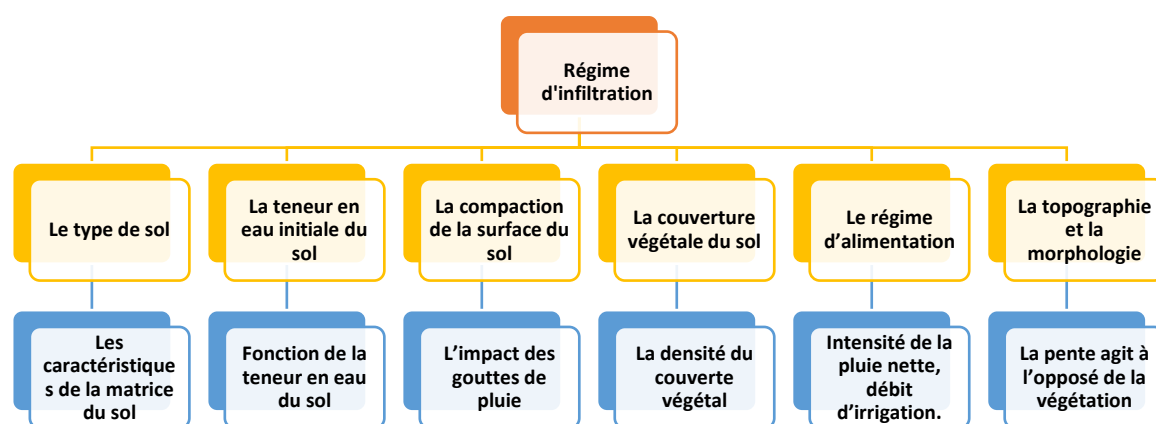


Figure 130: Facteurs et paramètres descriptifs de l'infiltration

D'une façon générale, les sources étudiées sont liées aux formations carbonatées du Lias, à l'exception de quelques sources appartenant aux calcaires du Pliocène (plateau de Saïss) et aux basaltes du Quaternaire (dir d'El Hajeb). Ces sources s'inscrivent dans un contexte hydrogéologique favorisant la recharge de la nappe profonde du Lias ainsi que la nappe phréatique superficielle du Plio-Quaternaire à partir des infiltrations des eaux de pluies, grâce à la fonte de la neige ou à cause des pertes des écoulements de surface, au niveau du Moyen Atlas (oued Tizguit comme exemple).

Généralement, les trois coupes géologiques ci-dessus (Fig. 131, 132, 133, 134) illustrent les trois situations hydrogéologiques responsables de l'émergence des sources de débordement et trop-plein (Ribaa amont et aval, Bittit, Atrous... Fig. 132), des sources d'émergence (Hijja, Fig. 133) et des sources artésiennes (Akkous Fig. 134).

La plupart des sources en question émergent sur la bordure du synclinal de Tizguit au pied de la flexure de Si Lmir et au contact des formations de dolomies liasiques et les coulées basaltiques du Plio-Quaternaire. Cette situation structurale et hydrogéologique regroupe un complexe de sources assez importantes, tels que la source de Akkou, Ribaa Amont, Ribaa aval, Bittit, Atrous, Ain Sbaa, Aguemguem... La distance entre ces sources ne dépasse pas 10 km. Les autres sources en aval de la zone d'étude (Ain

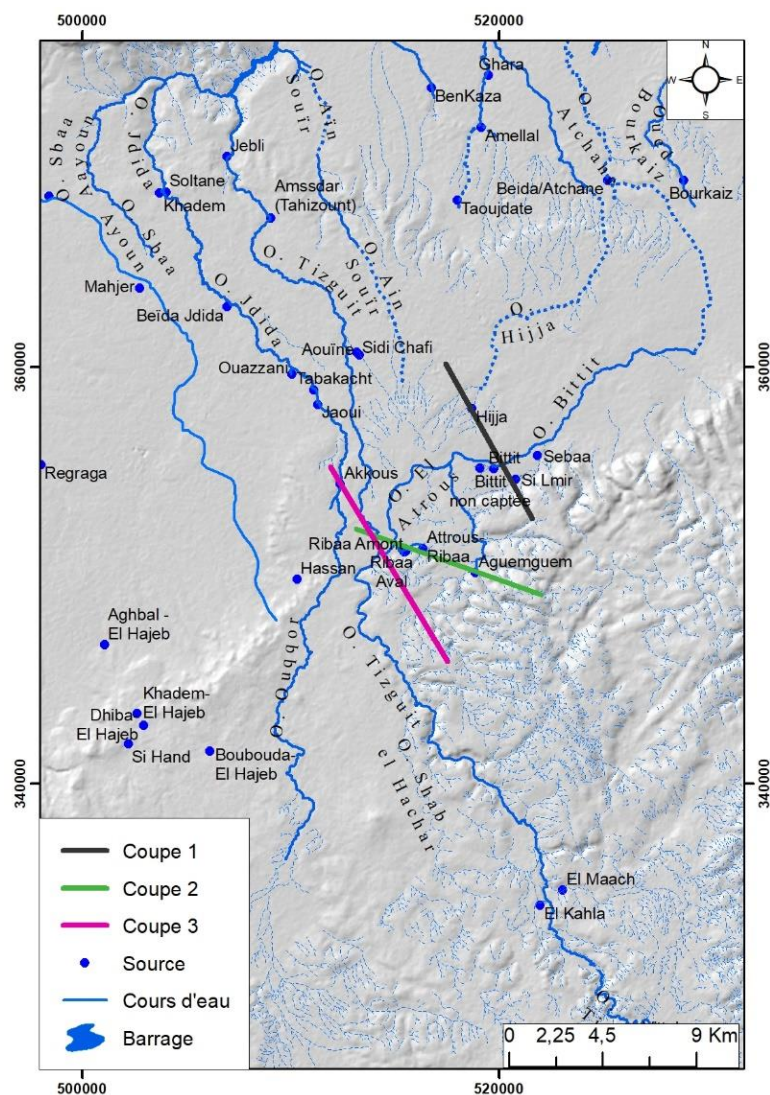
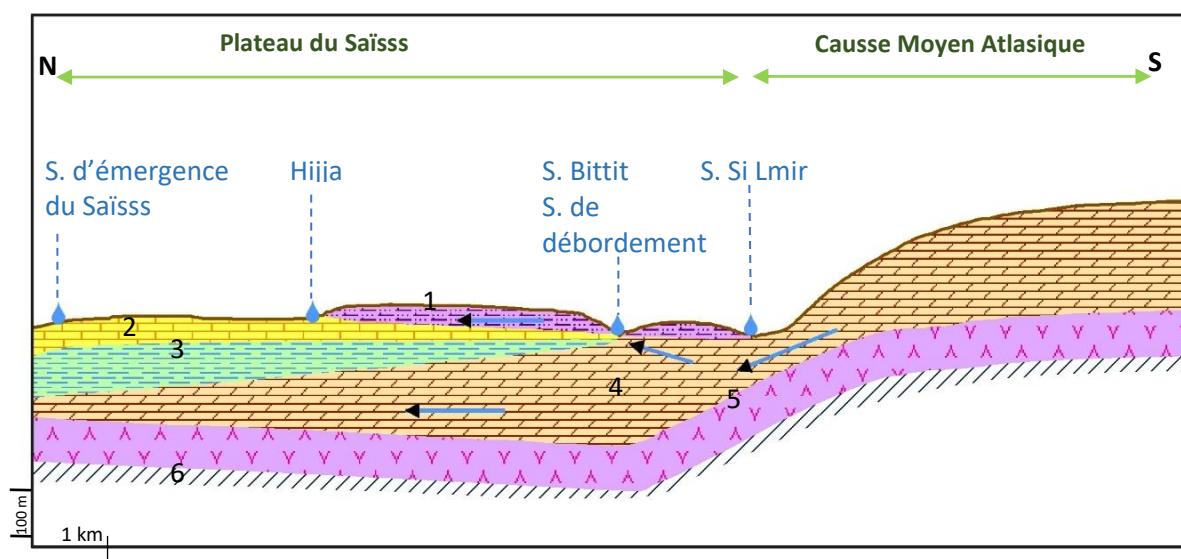


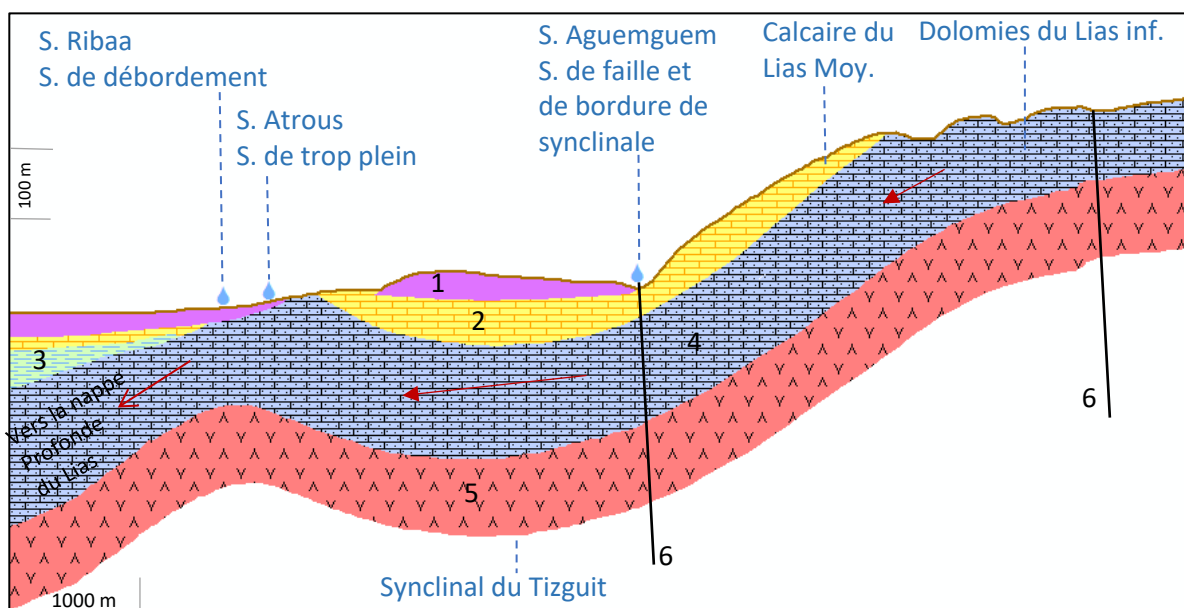
Figure 131: Localisation des coupes hydrogéologiques

Taoujdate, Ain Bourkaiz, Ain Chkef...) sont liées aux failles au niveau des formations Liasiques et Mio-Plio-Quaternaire du plateau de Saïss.



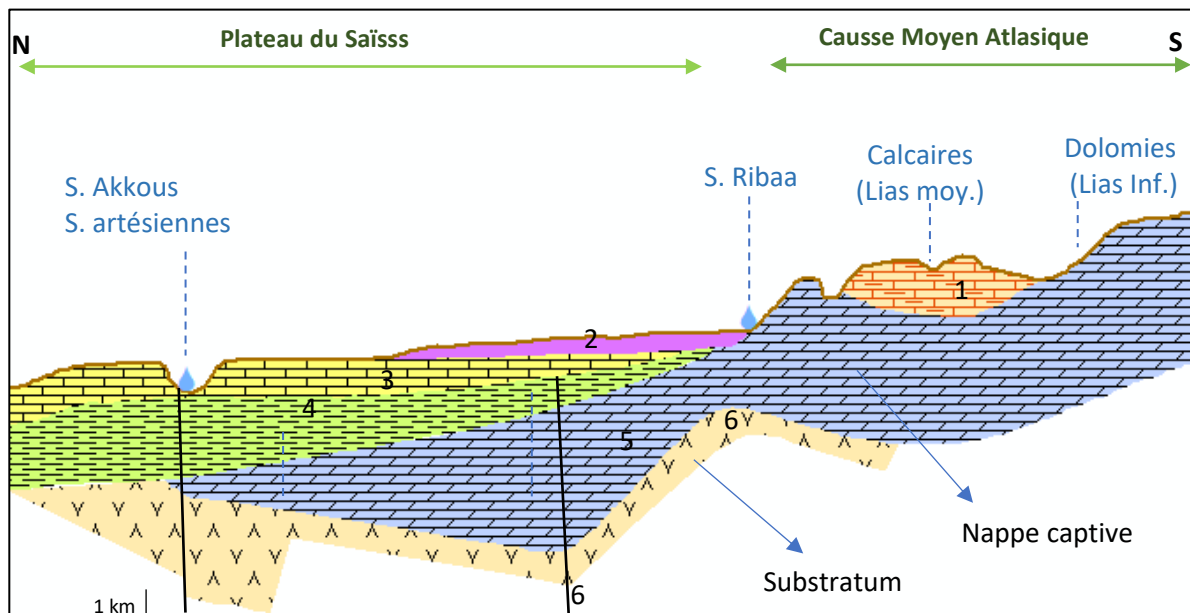
(1) : Basaltes des Plio-Quaternaire ; (2) : Calcaires lacustres du Pliocène ; (3) : Marnes du Miocène ; (4) : Dolomies du Lias inf. ; (5) : Trias ; (6) : Formation Paléozoïque

Figure 132: Coupe (1) hydrogéologique schématique du système de débordement Bittit - Sid Lmir. (Bahzad, (1986). Modifié)



(1) : Basaltes des Plio-Quaternaire ; (2) : Calcaires lacustres du Pliocène ; (3) : Marnes du Miocène. (4) : Calcaires et Dolomies du Lias ; (5) : Substratum Triasique imperméable ; (6) : Faille

Figure 133: Coupe (2) hydrogéologique schématique du complexe d'Ageumgeum, Ribaa e Atrous. (Bahzad, (1986). Modifié)



(1) : Calcaires du Lias Moy ; (2) : Basaltes du Quaternaire ; (3) : Calcaires lacustres du Pliocène ; (4) : Miocène imperméable ; (5) : Dolomies du Lias Inf. ; (6) : Substratum Triasique imperméable ; (7) : Faille

Figure 134: Coupe (3) hydrogéologique schématique du système artésien (Akkous). (Bahzad, (1986). Modifié)

Les eaux infiltrées en amont (pluies, fonte de neige ou écoulements de l'oued Tizguit) alimentent le système d'aquifère de la nappe libre qui resurgisse au piémont, au niveau des terrains carbonatés du Lias reposant sur un substratum imperméable formé d'argile rouge appartenant au trias. Dans ce contexte, la source de Ribaa jaillit au contact des formations dolomitiques du Lias inférieur et en contact avec les basaltes du quaternaire. Tandis que la source d'Aguemguem (qui se localise entre le complexe des sources de Ribaa et Bittit) émerge grâce à une faille (Fig. 133) qui traverse le substratum du trias vers les formations du Lias inférieur (dolomie) et moyen (calcaires).

Le contexte hydrogéologique présenté dans cet axe n'est qu'un rappel résumant les résultats de plusieurs recherches en relations avec l'hydrologie et l'hydrogéologie des sources en question. Dans le prochain axe, l'accent sera mis sur l'analyse du comportement hydrologique de ces sources, en se basant sur l'analyse de la variation de leurs débits qui dépend principalement sur plusieurs facteurs physiques et anthropiques.

8. Comportement hydrologique des sources des deux bassins versants étudiés

Comme il a été déjà souligné dans ce chapitre, les bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès recèlent plusieurs dizaines de sources de différents types. L'étude du comportement

hydrologique de ces sources dépend de la qualité et la longueur des séries d'observations hydrométriques. Or, seules les grandes sources sont jaugées d'une façon périodique et, malheureusement, les données manquantes sont beaucoup plus longues que celles observées. Face à cette indigence de données, on a essayé de produire des données représentatives et actualisées via des campagnes de jaugeages des sources, durant toute la période de préparation de cette thèse.

8.1 Les sources des Causses : un comportement hydrologique de type karstique

Ce type de sources caractérisent l'amont des deux bassins versants étudiés, où les terrains carbonatés favorisent l'infiltration des eaux de surface, pour donner un écoulement et un acheminement souterrain ou tout simplement pour contribuer à la recharge de l'aquifère. Pour approcher l'infiltration des eaux en amont de la zone d'étude, on va se baser sur la simple formule de calcul du taux d'infiltration. Cette formule s'écrit comme suite :

$$\text{Infiltration} = \text{Précipitations} - \text{ETR}$$

Dans cette formule, on a exclu les écoulements de surface qui sont presque nuls à ce niveau-là (voir axe du rendement hydrologique au *chapitre 3*). Et donc, d'après les résultats de l'évapotranspiration réelle (ETR) obtenus dans le *chapitre 2*, on pourra calculer le taux d'infiltration en amont des deux bassins versants étudiés. D'après la figure 135 ci-dessous, on peut voir clairement que la variation des taux d'infiltration (en pourcentage) varie d'une zone à l'autre en fonction de l'altitude. En effet, le Causse d'Ifrane _étant donné le plus arrosé_ connaît le taux d'infiltration le plus important par rapport aux Causses d'Imouzzer Kenddar et d'El Hajeb (Fig. 135).

Les valeurs calculées sont assez proches du taux d'infiltration adopté lors de l'établissement du modèle global à réservoirs portant sur le Causse moyen atlasique, qui a été

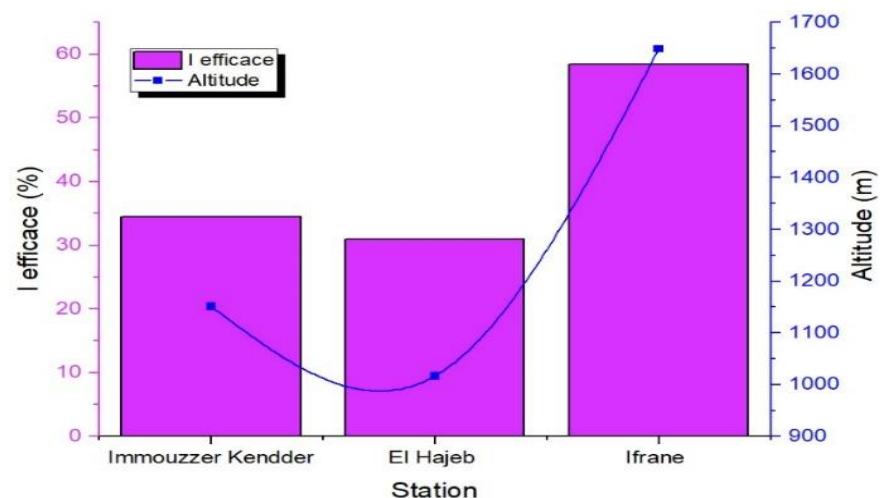


Figure 135: Infiltration efficace en % en amont des bassins versants étudiés

dans l'ordre de 32 % (Benjbara et al., 1989). Cette situation hydrogéologique et géomorphologique est à l'origine des résurgences des plusieurs sources en amont des bassins versants des oueds Fès et Mikkès comme les sources de Vittel, Zerrouka et Ain Sultane. Cette dernière se caractérise par un débit assez important. Les eaux de cette source sont embouteillées puis distribuées partout au Maroc (*eau de table : Aïn Sultane*). Le reste de son débit est destiné à l'irrigation. La figure 136 ci-dessous présente la variation des débits de la source d'Aïn Sultane. Les données de débits sont recueillies à partir des jaugeages périodiques de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou, puis complétées à partir des mesures qu'on a effectuées lors la préparation de cette thèse. À partir de cette figure, on peut dire que le régime hydrologique de la source Ain Sultane est irrégulier et fortement conditionné par les tendances pluviométriques. Or, en périodes humides des années 2009, 2010 et 2013, ses débits ont atteint 1000 L/s, tandis qu'au début des années 2000, les débits ne dépassent guère 200 L/s.

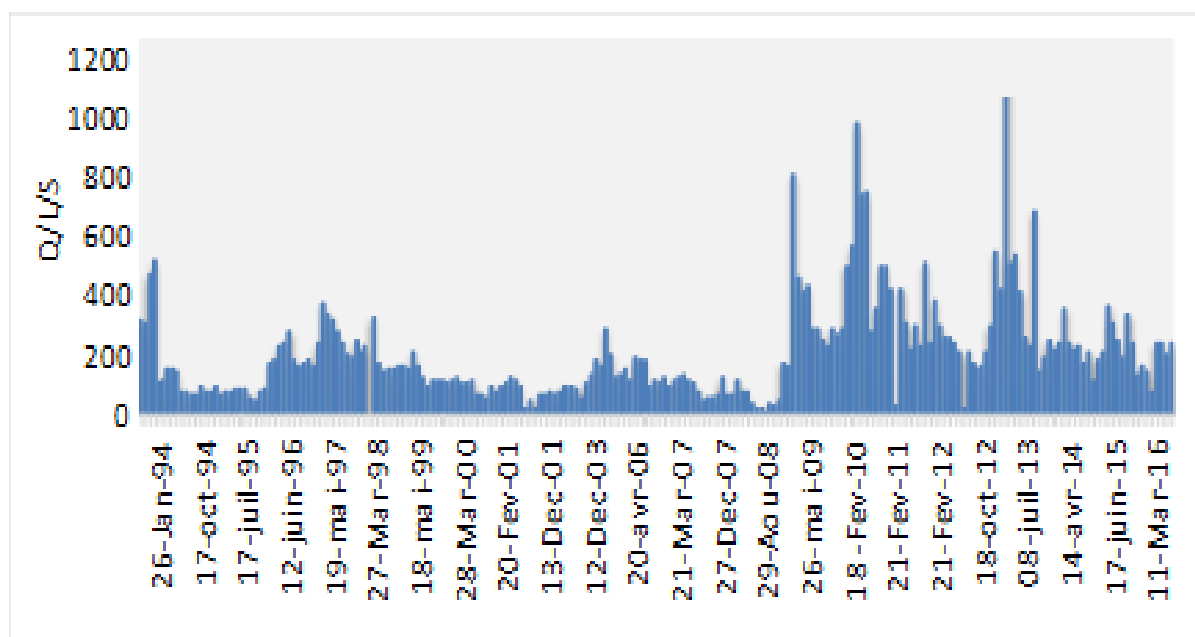


Figure 136: Variation des débits de la source Ain Sultane

8.2 Les sources du piémont : un régime hydrologique complexe

La nature très perméable des terrains en amont des deux bassins versants, joue un rôle primordial dans le stockage et l'emmagasinement des apports pluviométriques et niveaux. En effet, les fissures dans les massifs carbonatés ont favorisé un écoulement souterrain sous forme d'un karst bien développé. Plusieurs sources au niveau du piémont présentent l'un des aspects de ce système hydrogéologique. A titre d'exemple, les sources du complexe Ribaa-

Bittit sont débouchées de l'aquifère du Causse Hajeb-Ifrane. Ces sources artésiennes (Akkous) et de débordement (Ribaa Amont, Ribaa Aval, Bittit, Atrous et Sebaa) se caractérisent par un grand débit. Leur régime hydrologique est assez irrégulier. Il est illustré dans la figure 137 qui montre la variation des débits des sources : Ribaa Amont et Ribaa Aval. D'après cette figure, on peut dégager trois tendances bien distinctes.

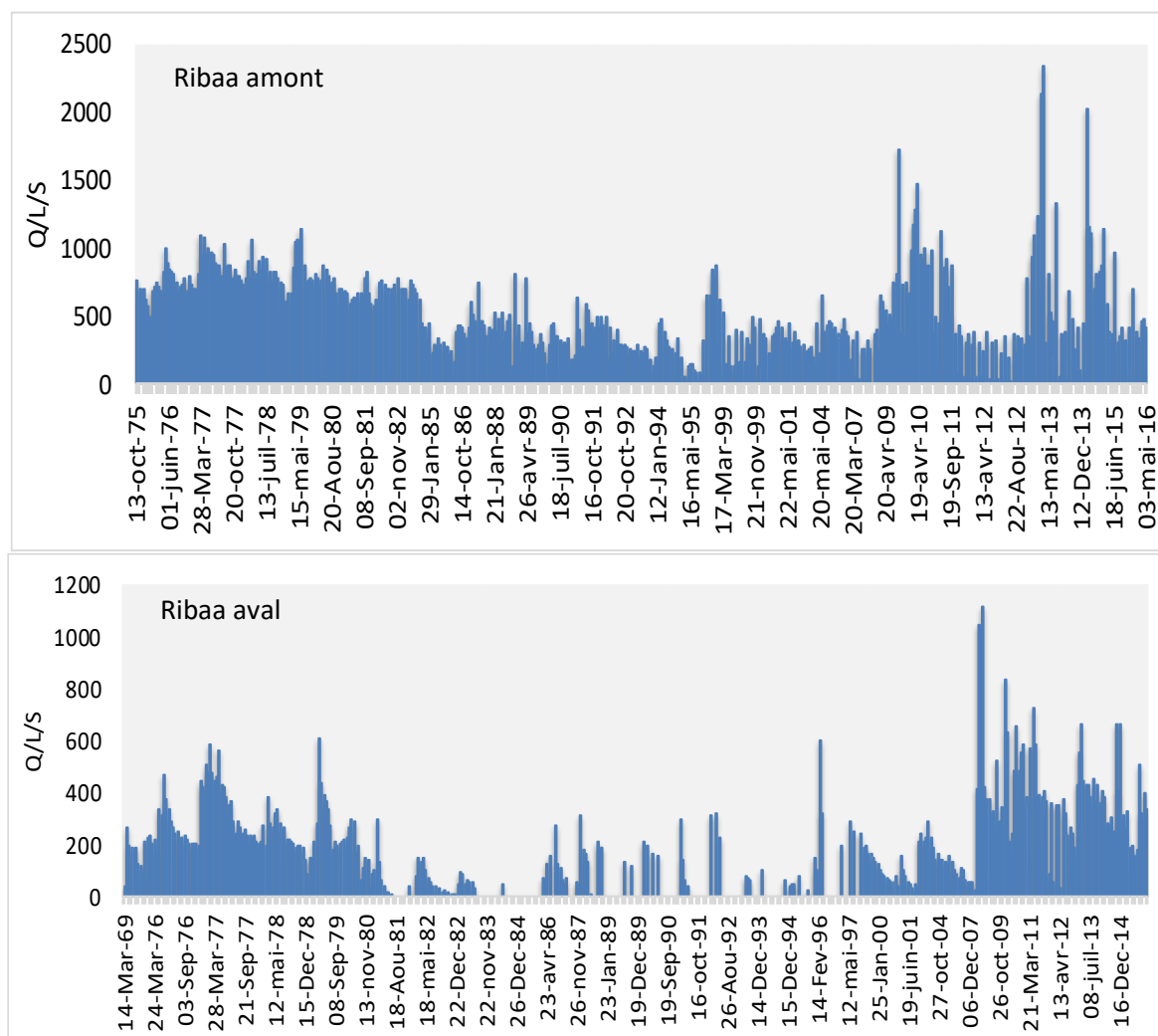


Figure 137: Variation temporelle des débits des source Ribaa amont et aval

Avant 1980 : les deux sources se caractérisaient par une productivité hydrique importante. Le débit de la source Ribaa Amont n'est jamais tombé au-dessous de 500 L/s. Il a atteint 773 L/s en octobre 1975 ; 755 L/s en mars 1976 ; 722 en août 1976 ; 1010 L/s en Mai 1977 ; 904 L/s en Janvier 1978 et 807 L/s en décembre de 1979. Par ailleurs, le débit de la source Ribaa Aval a été dans l'ordre de 36 L/s en mars 1969 ; 230 L/s en février 1976 ; 587 L/s en février 1977 ; 204 L/s en septembre 1978 et 210 en décembre 1979.

Entre 1980 et 1995 : le débit des sources Ribaa amont et aval a fortement diminuer. Durant cette période, le Maroc a connu une sécheresse aigue affectant les aquifères ainsi que les débits des sources qui ont connu tarissement voire même un assèchement total. Malgré cette période sèche, la source Ribaa amont n'a jamais séché, mais son débit a diminué d'une façon remarquable. Il a atteint 69 L/s en mars 1995, soit une baisse d'à peu près 1000 l/s par rapport à octobre 1976. Le débit maximal de cette période a été enregistré en octobre 1988, avec une productivité de 805 L/s. La source Ribaa aval, quant à elle, a connu un assèchement total pendant plusieurs années (1982, 1985 et 1991). Le débit maximal de cette période a été dans l'ordre de 322 L/s en mai 1992.

Entre 1996 et 2016 : l'année 1996 est marquée par le retour des pluies, et par conséquent une augmentation des débits des sources étudiées. Après cette année exceptionnelle, la sécheresse a régné encore une fois sur le Maroc, jusqu'en 2009, où on a assisté à une nouvelle tendance très humide. Le record absolu du débit de Ribaa amont (photo 72) a été enregistré en avril 2013, avec 2349 L /s et 1117 L/s à Ribaa aval (photo 73) en mars 2009.



Photo 72: Ribaa Amont (29 février 2016)



Photo 73: Ribaa Aval (29 février 2016)

Après l'étude du régime hydrologique des sources Ribaa, on passe vers l'Est pour analyser deux sources très complexes, il s'agit des sources Bittit et Aguemguem. Ces dernières se caractérisent par un régime hydrologique très différent, malgré que la distance entre elles ne dépasse pas 5 km. Cette différence est illustrée dans les deux figures 138 et 139. Dans la première figure, on peut voir le régime hydrologique de la source Aguemguem est très irrégulier à l'échelle annuelle et saisonnière (entre les hautes eaux (photo 74) et les basses eaux (photo 75). D'une année à l'autre, le débit de cette source peut dépasser 2000 L/s en périodes humides (1996, 2009, 2010, 2013 et 2015) et assécher complètement en périodes de sécheresses.

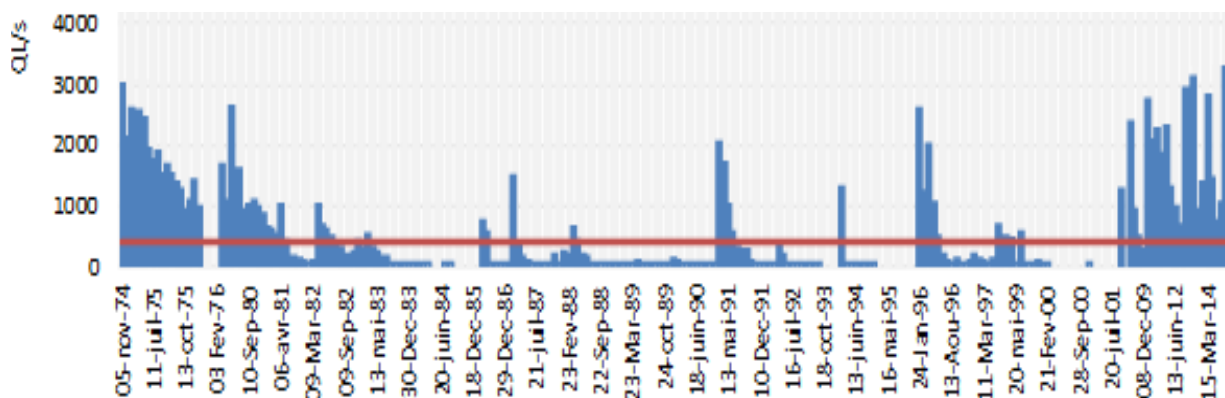


Figure 138: Variation des débits de la source d'Aguemguem



Photo 74: Situation de la source d'Aguemguem en hautes eaux (25 Mai 2016)



Photo 75: Situation de la source d'Aguemguem en basses eaux (8 Sept 2016)

Par ailleurs, la source de Bittit se caractérise par un régime hydrologique assez stable, illustré dans la figure 139 ci-dessous. Son débit reste le plus souvent entre 500 et 700 L/s. Cependant, en mai 1981, cette source a connu un assèchement total. Cet événement a affecté toutes les sources du piémont.

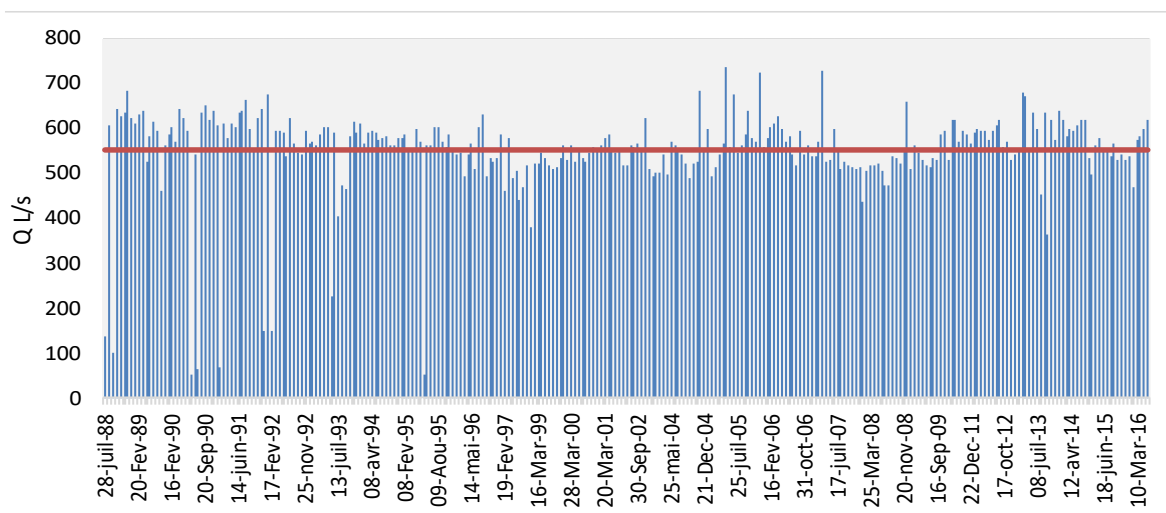


Figure 139: Variation des débits de la source de Bittit

Elles sont devenues des émergences temporaires qui se manifestent par intermittence lors des périodes de grandes averses. Les sources de trop-plein qui se situent dans une position assez haute et dont les variations de débit sont notables (fort indice de variabilité) sont les sources les plus sensibles aux épisodes de sécheresse (Amraoui, 2005).



Photo 76: Source de Bittit (29 février 2016)



Photo 77: Source de Bittit (28 Juin 2014)

8.3 Sources du plateau de Saïss : de l'abondance à l'indigence

À l'instar du Moyen Atlas et son piémont, le plateau de Saïss se caractérise par plusieurs sources qui jaillissent de la nappe phréatique du Plio-Quaternaire et la nappe profonde du Lias. En effet, ce sont des sources d'émergence et de déversement qui ont des débits assez variables. Ces débits ont diminué d'une façon spectaculaire durant les années 1980, et malheureusement, beaucoup d'entre elles, se sont complètement séchées au début des années 2000 (Tab. 37). Malgré le retour des pluies, ces sources n'ont pas pu se régénérer à cause des pompages qui ont accentué l'ampleur du déficit hydrique durant les années sèches.

Source / Ain...	Coord_X	Coord_Y	Q Avr. 1988	Q Mai 2004
Cheggag	532,83	365,05	115	0
Beida/Atchane	525,20	368,95	1	0
Ouazzani	510,05	359,65	7	0
Mahjer	502,75	363,80	9	0
Bergama Sghira	526,95	377,98	0	0
Sejra	498,40	368,20	18	0
Souira-sejra	494,90	369,40	17	0
Boutouahene	512,65	380,70	5	0
Taoujdate	518,00	368,00	1	0
Bou Fouaz Fès	540,31	385,69	1	0
Hijja	518,70	358,00	0	0
Kharrouba	495,00	352,75	46	0
Regraga	498,00	355,30	1,5	0
Ezzroureg	516,40	381,30	201	0
Affeame	533,45	365,98	2	0

Tableau 38: Sources ayant séchées au niveau de Saïss

Parmi les plus importantes sources qu'ayant séchées, on trouve la source d'Ain Cheggag (Photo 77) (BV oued Fès) qui avait un débit de 115 L/s en avril 1988, ainsi que la source Boukhnafer (Photo 78) (BV oued Mikkès), dont le débit dépassait 50 L/s en 1988. Les phénomènes de tarissement de ces sources sont liés, d'une part, à la diminution des débits des oueds traversant le plateau de Saïss, et d'autre part, aux effets néfastes des pompages accélérés et destinés à l'approvisionnement des centres urbains et ruraux en eau potable, ainsi que l'eau d'irrigation.



Photo 78: Source Ain Cheggag (28 juin 2014)



Photo 79: Source Boukhnafer (29 Nov. 2017)

En ce qui concerne les grandes sources, Ain Chkef présente un bon exemple. Elle est destinée à l'alimentation de l'agglomération de Fès en eau potable. Cette source se caractérise par des débits assez stables, illustrés dans la figure 140 qui montre trois périodes assez différentes.

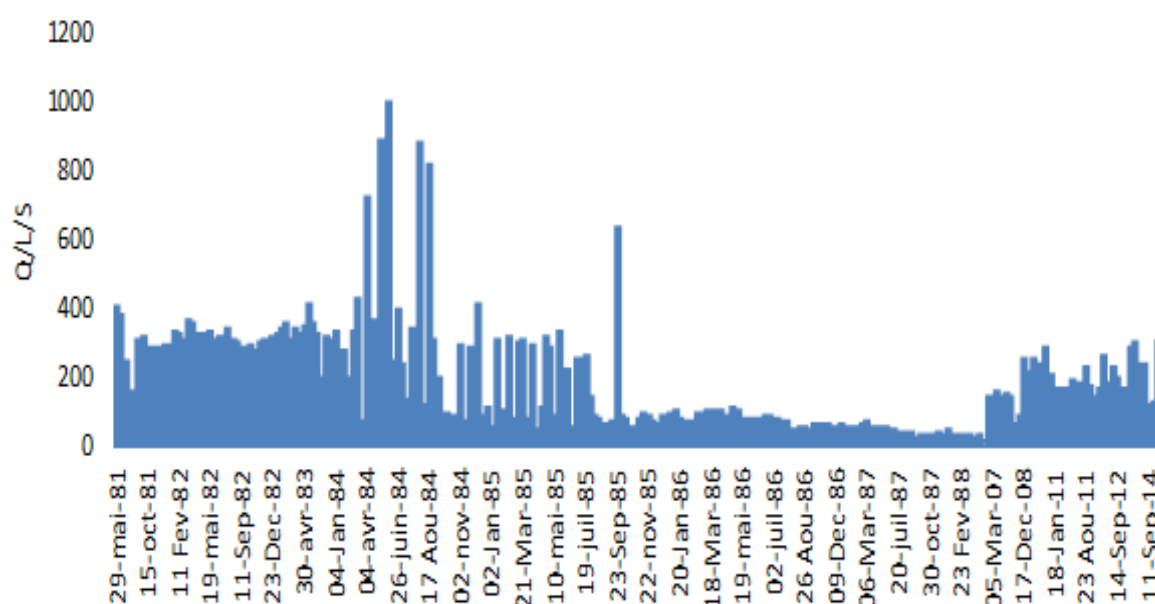


Figure 140: Variation des débits de la source d'Ain Chkef

- **La première période** (avant 1984) se caractérise par des apports hydriques assez importants. Le débit est resté plus ou moins stable durant toute cette période ; jusqu'à l'année 1984 où le débit a atteint 991 en moi de mai. Après cette année exceptionnelle, une nouvelle tendance sèche s'impose.
- Durant **la deuxième période** le débit moyen de la source Ain Chkef chute de 250 L/s (1981-1984) à seulement 57 L/s (1985-2007). Durant cette période, le débit de la source Ain Chkef est resté très stable aux alentours de 50 L/s. Le débit minimum a été enregistré en septembre 1988, avec seulement 11 L/s.
- **La troisième période** (2007-2015) correspond aux années humides, augmentant le débit moyen de cette source jusqu'à 193 L/s. Le débit maximum a été enregistré en décembre 2015, avec 639 L/s.

Une deuxième source mérite d'être étudiée, il s'agit de la source Amellal au niveau du bassin versant de l'oued Mikkès. Comme la source Rhara (photo 80), Amellal (Photo 81) est une source mixte (débordement et émergence). D'après la figure 141 ci-dessous, on peut voir clairement que les débits de cette source ont connu une régression constante, jusqu'au débit des années 2010. Durant la fin des années 1960, les débits de cette source dépassent généralement 100 L/s. Mais, au cours des années 1980, la moyenne de son débit chute à 86 L/s, puis 54 L/s comme moyenne des années 1990, ensuite 25 L/s durant les années 2000 et enfin, cette moyenne est remontée à 45 L/s durant la moitié de la deuxième décennie (2010-2015). Plus récemment, la dernière mesure qu'on a effectuée sur cette source (février 2018) a donné 92 L/s comme débit instantané.

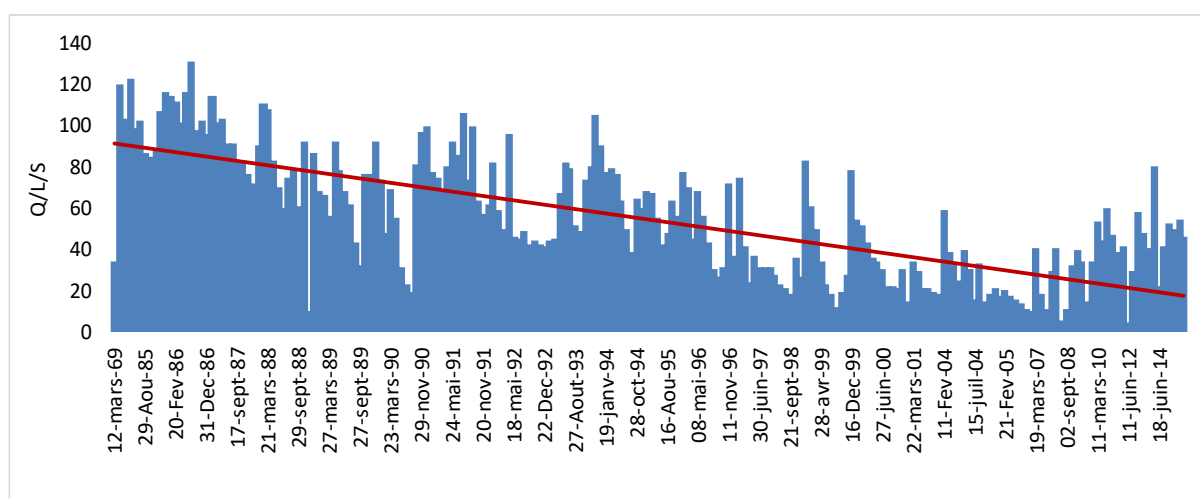


Figure 141: Variation des débits de la source Amellal

**Photo 80: Source Rhara (25 février 2018)****Photo 81: Source Amellal (captée dans un canal) (25 février 2018)**

Généralement, les sources du Moyen Atlas, du dir et du plateau de Saïss sont marquées par des comportements hydrologiques très différents. Les sources du Causse sont les plus sensibles aux variations des précipitations, par rapport à celles du piémont et du plateau, qui sont alimentées via les aquifères Liasiques et Plio-Quaternaire. Cette sensibilité est bien visible à l'échelle annuelle, mais, qu'en est-il pour l'échelle saisonnière ?

Pour répondre à cette question, on va se baser sur les mesures périodiques des sources Ribaa amont et Bittit. Le choix de ces deux sources est justifié par leurs chroniques d'observation homogènes et leurs données peu manquantes. Le tableau 38 ci-dessous, récapitule les variations saisonnières de ces deux sources.

Sources	Année	L'hiver	Le printemps	L'été	L'automne
Ribaa amont	1988	737,33	830,00	761,33	720,00
	1994	324,50	401,67	267,67	246,67
	2000	323,00	344,00	208,00	368,00
	2010	1075,50	1238,00	930,00	929,50
	2015	260,60	*	498,25	352,00
Bittit	1988	621,00	*	371,25	648,33
	1994	584,25	592,00	578,00	560,50
	2000	545,00	547,33	536,00	553,50
	2015	530,00	565,00	546,33	546,00
	2017	*	743,00	*	*

Tableau 39: Variations saisonnières des débits des sources Ribaa Amont et Bittit
NB : * Donnée manquante

D'après la figure 142 ci-dessous, on peut dire que les sources Bittit et Ribaa Amont ont un régime régulier. Le printemps (hautes eaux) est la seule saison où le débit est visiblement assez important par rapport aux autres saisons, qui ont presque le même module saisonnier. Ce régime hydrologique n'est pas commun à toutes les sources étudiées. À partir des travaux de terrains effectués, on a observé une grande différence de débits entre les hautes et les basses eaux, mais malheureusement, les données recueillies sont insuffisantes pour effectuer une telle analyse sur le régime saisonnier des autres sources. En effet, d'après Amraoui 2015, les sources *Aguemguem, Attrous et Si Lmir* sont devenues dès 1984 des émergences à régime temporaire, se manifestant lors des grandes averses, avec des fluctuations saisonnières beaucoup plus marquées qu'auparavant.

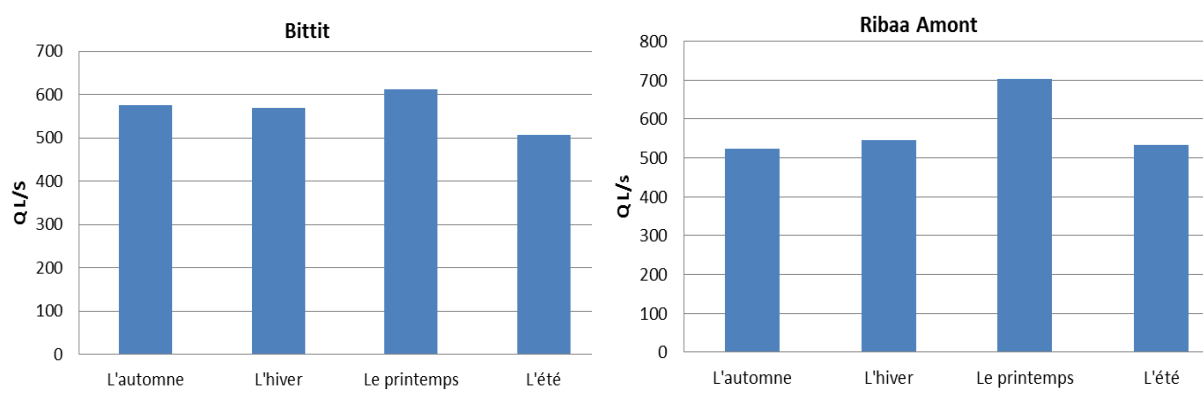


Figure 142: Variation saisonnière des débits des sources Bittit et Ribaa amont

A la fin de cet axe, on peut dire que les sources dans les bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès sont très nombreuses et se caractérisent par des apports hydriques assez importants. Le comportement hydrologique de ces sources est très variable et dépend directement du contexte hydrogéologique qui contribue à leur alimentation. Cependant, le facteur déterminant le rendement de ces sources est résumé dans les apports pluviométriques. Alors, quelle est la relation entre la pluie et le débit de ces sources.

9. Relation pluie-débit des sources des deux bassins versants étudié

Pour bien comprendre la relation entre les précipitations et le débit des sources localisées dans les deux bassins versants étudié, cette analyse est basée sur les moyennes mensuelles des précipitations des stations Ifrane, Fès-Saïss et Meknès localisées à proximité des sources Ribaa, Aguemguem, Ain Chkef, Ain Sultane, Ras El Ma et Amellal. La figure 143 schématise la méthodologie adoptée pour réaliser cette étude.

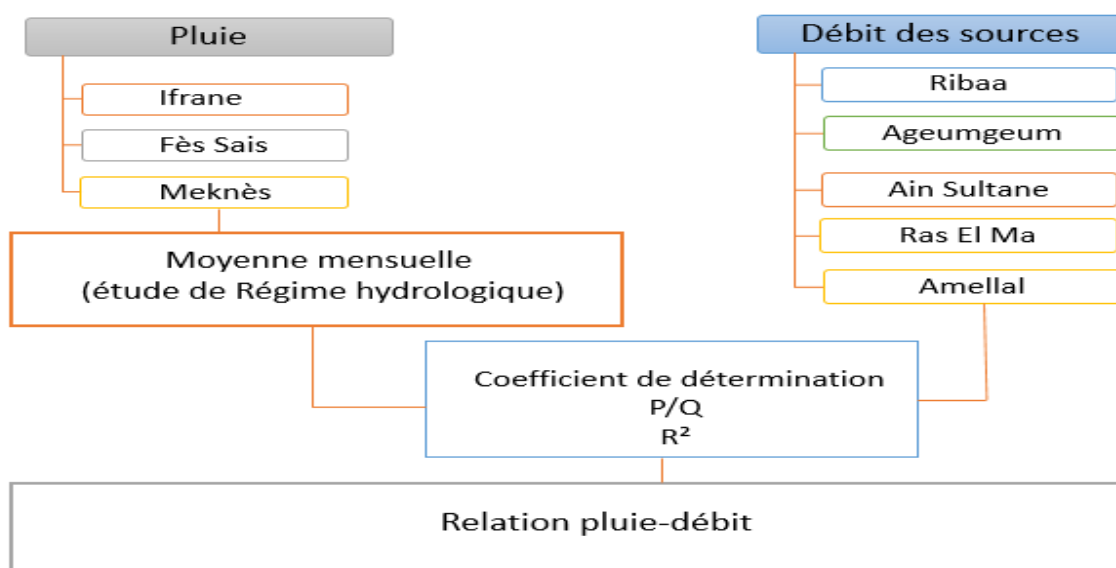


Figure 143: Schéma simplifié de la méthode adoptée pour l'analyse de la relation pluie-débit

La méthode adoptée dans cet axe vise à comprendre la relation entre les apports pluviométriques et les débits des sources de la zone en question, en se basant sur les coefficients de détermination. Les figures 144, 145, 146, 147, 148 et 149 présentent les coefficients de déterminations des six sources avec les stations pluviométriques de contrôle. Ces résultats sont récapitulés dans le tableau 39.

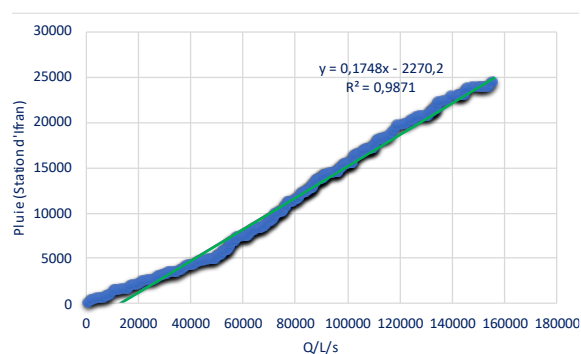


Figure 144: Relation pluie débit de la source Ribaa (janv. 1978 / Déc. 2014)

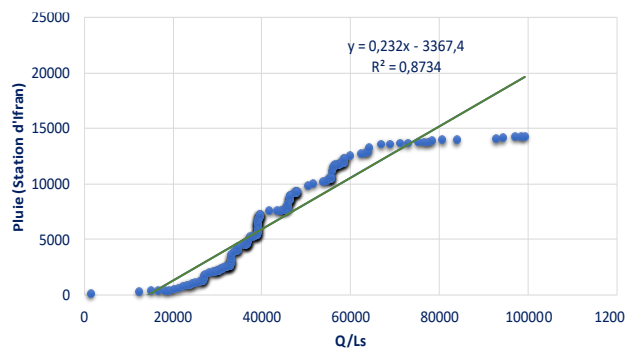


Figure 145: relation Pluie-Débit de la source d'Ageumgeum (Févr.1980 / Sept. 2014)

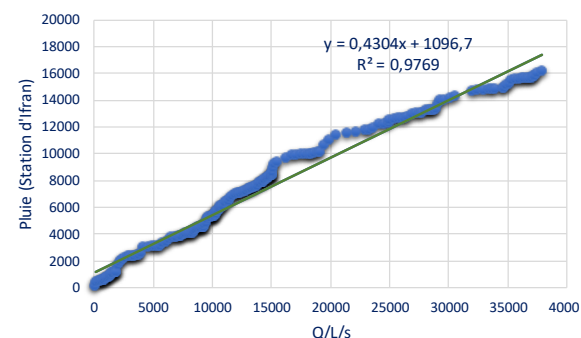


Figure 146: Relation Pluie de la source d'Ain Sultane (Janv.1994 / Déc.2014)

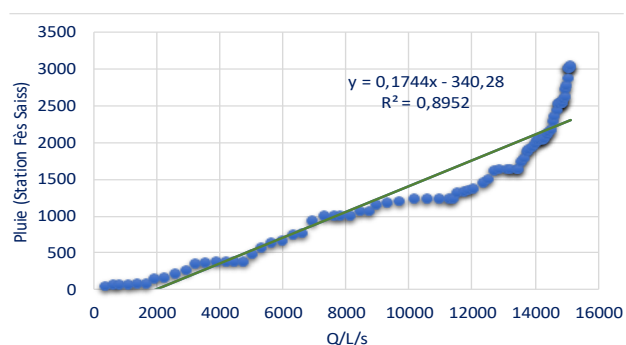


Figure 147: Relation Pluie-Débit de la source d'Ain Chkef (Mai.81 / Mai.1988)

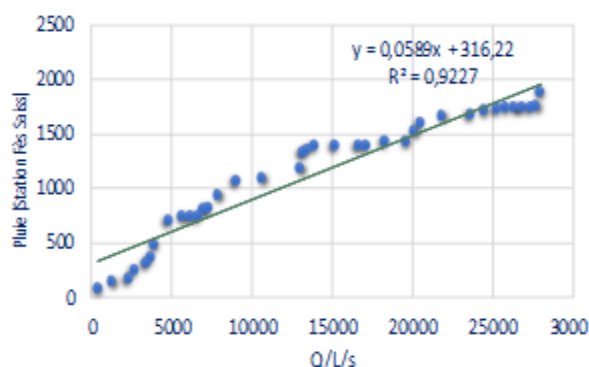


Figure 148: Relation Pluie-Débit de la source Ras El Ma (Mars. 2010 / Nov. 2014)

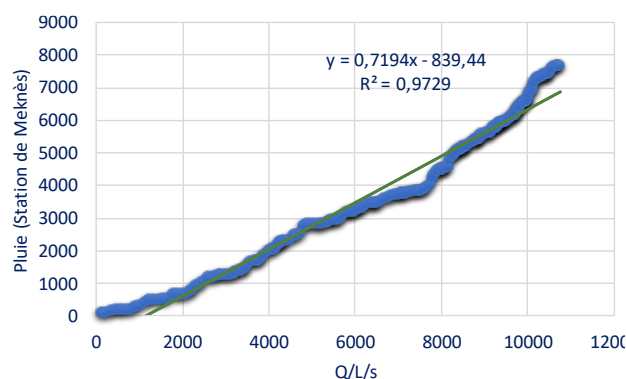


Figure 149: Relation Pluie-Débit de la source d'Amellal (janv.1985 / Sept.2014)

Source	Période d'étude	Localisation	Station climatique de contrôle	Coefficient de détermination (R^2)
Ribaa Amont	Janvier 1978 au Décembre 2014	Piémont du Causse	Ifrane	0,98
Ageumgeum	Février 1980 au septembre 2014	Piémont du Causse	Ifrane	0,87
Ain Sultane	Janvier 1994 au Décembre 2014	Causse d'Imouzzer	Ifrane	0,97
Ain Chkef	Mai 1981 au Mai 1988	Plateau de Saïss Fès	Fès Saïss	0,89
Ras El Ma	Mars 2010 au Novembre 2014	Plateau de Saïss Fès	Fès Saïss	0,92
Amlal	Janvier 1985 au septembre 2014	Plateau d'Aïn Taoujdate	Meknès	0,97

Tableau 40: Coefficients de détermination des 6 sources avec les stations de contrôle

A l'exception d'Ain Chkef ($R^2=0.89$) et Aguemguem ($R^2=0.87$), les débits des sources étudiées ont une très forte corrélation avec les apports pluviométriques ($R^2>0.97$). Les relations et les tendances pluie-débit sont bien illustrées dans les six figures ci-dessous. D'après ces dernières, on voit clairement que suite à chaque épisode pluvieux de forte intensité, le débit des sources augmente d'une façon remarquable, toujours à l'exception des sources Aguemguem et Ain Chkef. Cela est expliqué par le mode spécial de la recharge et vidange des aquifères qui sont à l'origine de ces deux sources. Sans oublier le facteur anthropique qui influence profondément le fonctionnement hydrologique des sources en question. En effet, le pompage et les prélèvements des eaux des oueds jouent un rôle contrôlant cette relation entre la pluviométrie et les débits des sources.

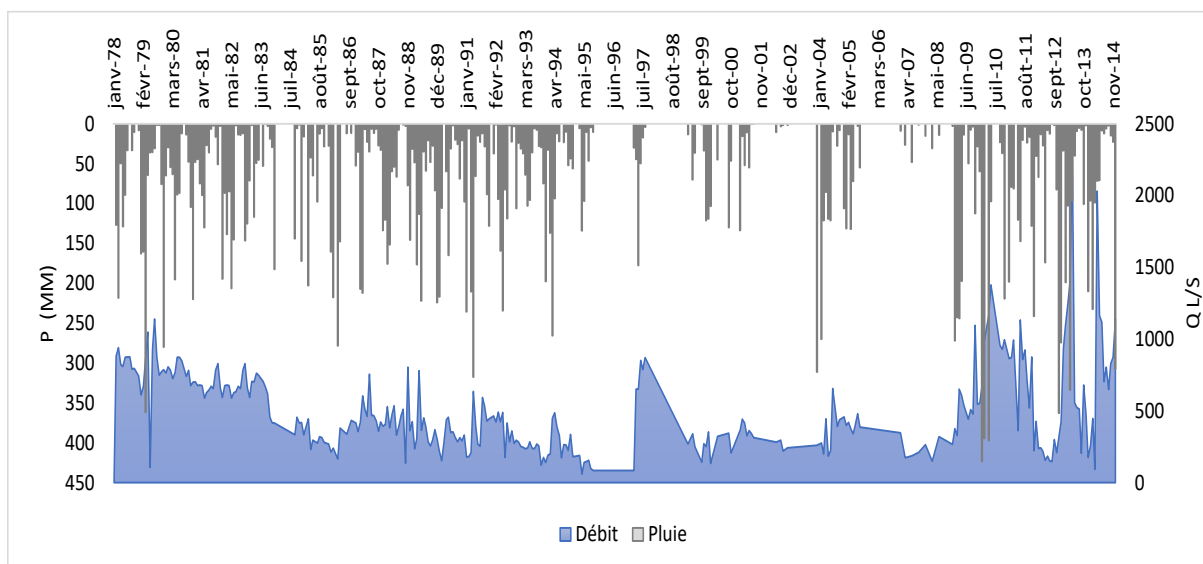


Figure 150: relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source de Ribaa

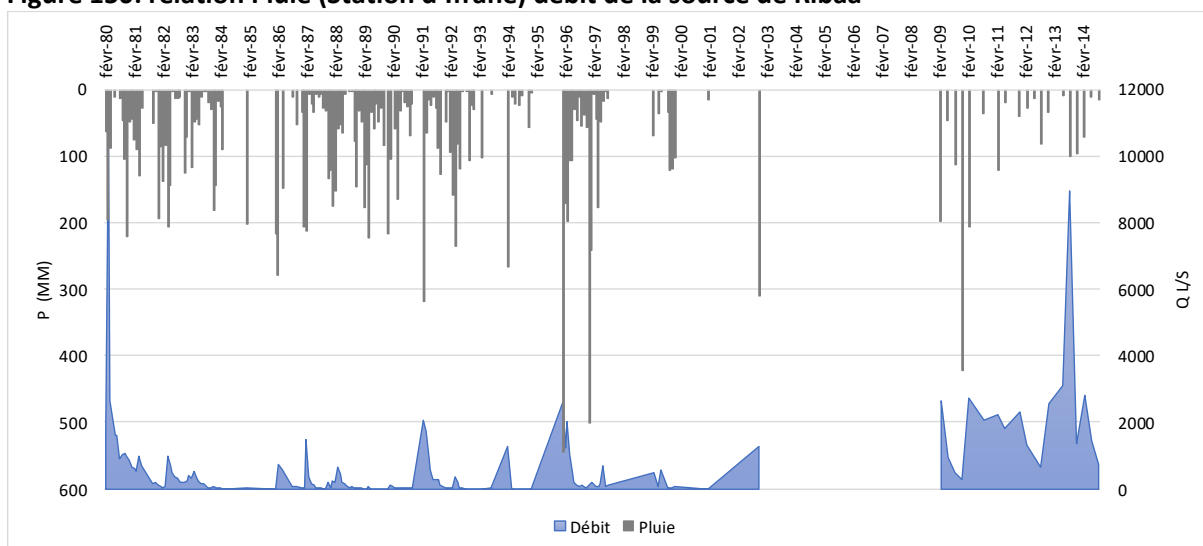


Figure 151: Relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source d'Ageumgeum

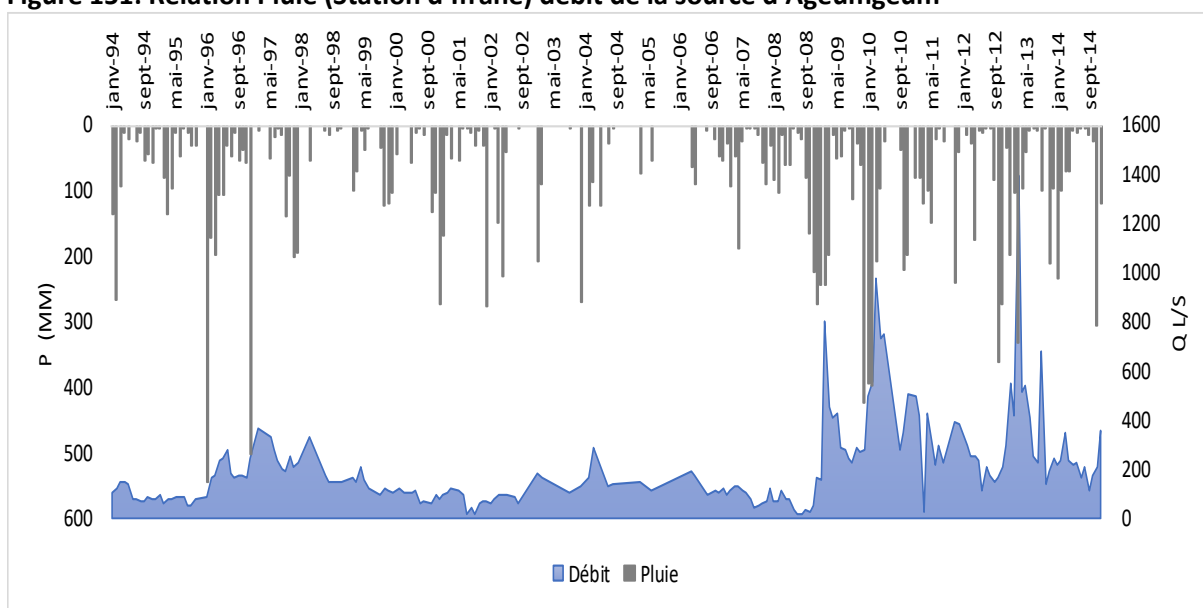


Figure 152: Relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source d'Ain Sultane

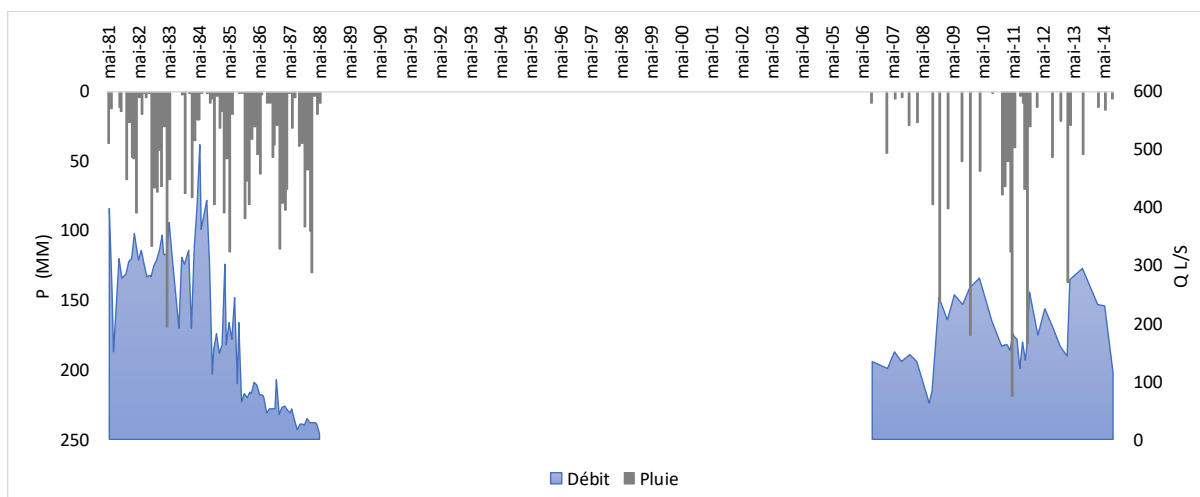


Figure 153: Relation Pluie (Station de Fès Saïss) débit de la source d'Ain Chkef

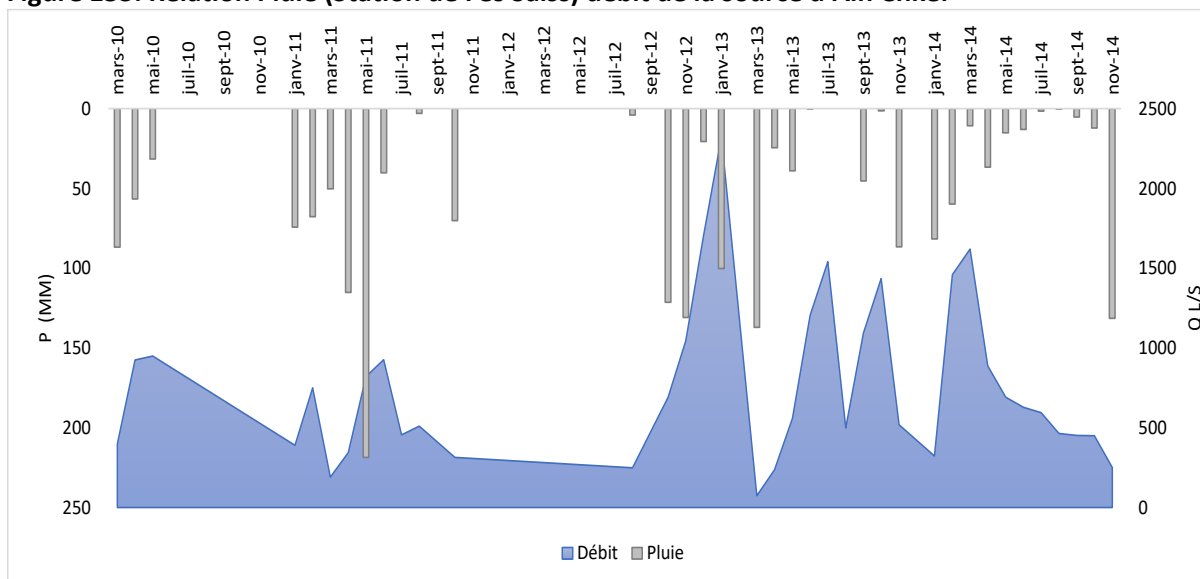


Figure 154: Relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source de Ras El Ma

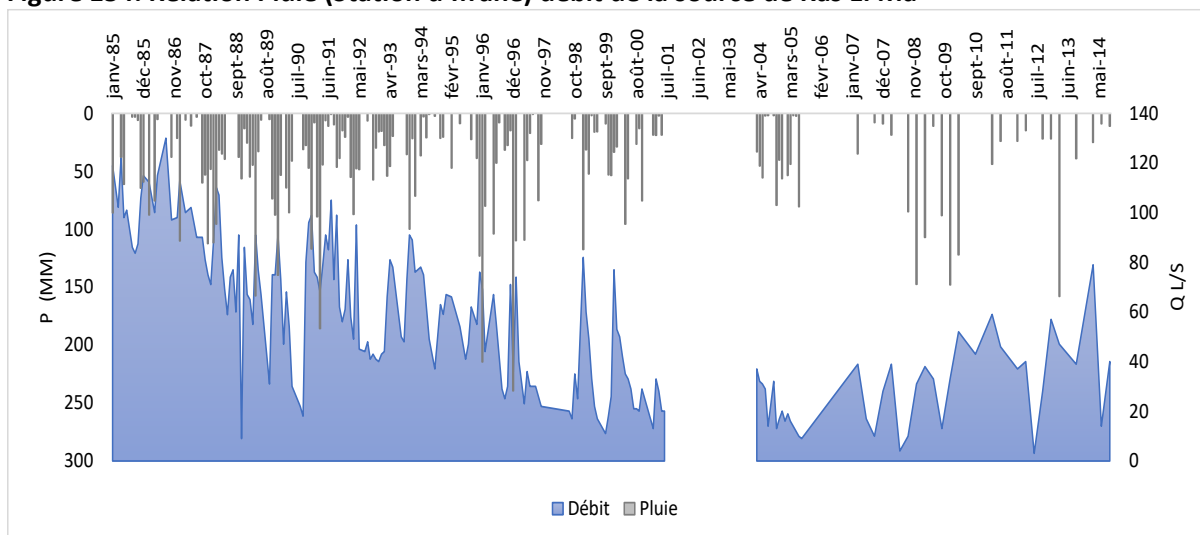


Figure 155: Relation Pluie (Station Meknès) débit de la source d'Amellal

Généralement, le type des précipitations (pluie ou neige), leurs intensités (orages), la capacité d'infiltration, le type de la lithologie, la rétention et l'emmagasinement d'eau dans

les aquifères, sont tous des paramètres qui contrôlent la relation entre la pluviométrie et les débits des sources. Cependant, il faut mentionner qu'après les années sèches, cette relation pluie-débit est moins importante. Car, dès le retour des pluies, la réaction des sources ne sera pas immédiate face aux sollicitations. Par ailleurs, l'influence de facteur humain peut bouleverser cette relation pluie débit ; non pas seulement par l'exploitation des ressources en eau, mais aussi via la modification de plusieurs paramètres d'infiltration, de rétention de sols, de recharge et même d'évacuation des aquifères.

En conclusion, les apports pluviométriques influencent directement le comportement hydrologique des sources des bassins versants des oueds Fès et Mikkès. Ces sollicitations (pluie ou neige) contrôlent la productivité des sources ainsi que la qualité de leurs eaux. Ce phénomène fait d'objet du prochain axe.

10. Phénomène de turbidité des eaux des sources

Après avoir abordé la relation entre les apports pluviométriques et les débits des sources de la zone d'étude, cet axe est focalisé sur l'étude du phénomène de turbidité de quelques sources. La turbidité est un phénomène qui désigne la teneur des eaux des sources en matières qui les troublent. Ce phénomène est à l'origine de plusieurs facteurs, qui augmentent le taux des particules (organiques ou minérales) en suspensions dans l'eau. D'une façon générale, ce phénomène est le plus souvent associé aux épisodes pluvieux de fortes intensités (orages), qui génèrent des crues à la surface ainsi que des résurgences de forte turbidité.

Cette étude est focalisée sur les sources de Bittit et Ribaa. Ces deux sources connaissent ce phénomène d'une façon très fréquente. Les photos 82, 83, 84 et 85, présentent ces sources en état stable (à gauche) et en situation de turbidité (à droite). Ce phénomène dégrade la qualité des eaux potables au niveau de l'agglomération de Meknès. A cause de ce problème, plusieurs études ont cherché à expliquer ce phénomène.

En 2013, Amyay et *al* ont démontré que les écoulements de surface (pleins en particules en suspension) générés par des périodes pluvieuses de fortes intensités, sont rapidement infiltrés via des ponors et vers des cavités karstiques. Ces eaux souterraines s'acheminent et resurgissent via les sources du piémont, à travers un réseau de conduites souterraines. Cette étude a conclu également que l'intervention humaine joue aussi un rôle indirect dans ce

processus, car les mutations de l'occupation du sol au niveau du Causse du Moyen Atlas favorisent l'accélération de l'érosion.



Photo 82: Source Bittit en situation normale (29/02/2016)



Photo 83: Source de Bittit en turbidité (12/04/2015)



Photo 84: Source Ribaa en situation normale (29/02/2016)



Photo 85: Source de Ribaa en turbidité (12/04/2015)

Pour analyser ce phénomène, on va se baser sur les résultats de Brett (2019). Cette étude a été consacrée aux sources Ribaa, Zerrouka et Sidi Rached. À partir des données de précipitations journalières (station Ifrane) et les mesure de turbidité de la source Ribaa (réalisées dans le cadre de la recherche mentionnée ci-dessus), cette étude a pu mettre en évidence la relation entre l'intensité des précipitations et le degré de turbidité des eaux de la source Ribaa en NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*) pendant deux évènements en 2014 et 2015 (Fig. 156). D'après cette figure, on peut voir que l'impact des épisodes pluvieux de fortes intensités sur la turbidité de la source Ribaa n'est pas immédiat. Dans le même sens, les épisodes pluvieux de faible intensité n'influencent pas sa turbidité.

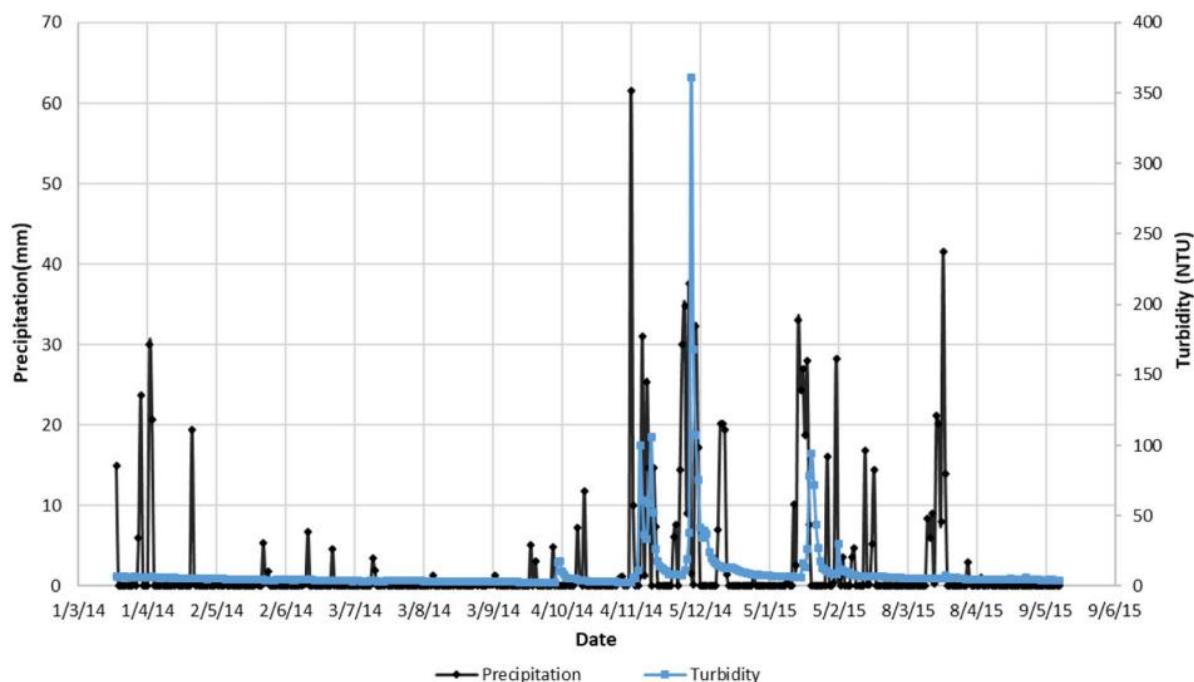


Figure 156: Précipitation journalière à Ifrane et turbidité de la source Ribaa. (Source : Brett A. 2019)

Pour conclure ce volet concernant les sources, on peut dire que les précipitations jouent un rôle très important au niveau de la quantité des apports hydriques des sources en question. Les sources ayant un régime hydrologique régulier se caractérisent par des apports hydriques importants par rapport aux sources irrégulières. Les variations des débits de ces sources au cours de la période étudiée montrent que plusieurs sources ont un régime hydrologique stable (Bittit, Ain Chkef, Ribaa...) et d'autres non stable (Aguemguem et Amellal). Ces sources ayant un grand indice de variabilité est souvent quasi nul, mais elles peuvent gonfler de manière très importante en cas d'orage. Enfin, il ne faut pas négliger le rôle du facteur anthropique dans le bouleversement de l'hydrosystème de ces deux bassins versants limitrophes.

11. Exploitation des ressources en eau

Cet axe se focalise sur les aspects d'exploitation des ressources en eau souterraines et de surfaces. Ces ressources sont exploitées pour différents usagers, notamment l'irrigation des exploitations agricoles et l'alimentation en potable.

11.1 Eau d'irrigation : une ressource de plus en plus sollicitée

L'abondance des ressources hydriques dans la zone d'étude explique les mutations spatiotemporelles des exploitations agricoles. Le périmètre irrigué gagne de surface d'une année à l'autre. Il faut admettre qu'il est très difficile de quantifier le volume des eaux

prélevées destinées à l'irrigation, notamment celles en prévenance des nappes Plio-Quaternaire et Liasiques. Cependant, le tableau 40 récapitule les superficies irriguées par les différents systèmes d'irrigation au niveau des bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès.

Commune urbaine/rurale	Irrigation privée par pompage de la nappe						PMH	
	Gravitaire	Localisée	Aspersion	Pivot	Total	Nombre des exploitations	Superficie (ha)	Nombre des exploitations
Ain Taoujdate	20	-	-	-	20	10	90	40
Sbaa Ayoun	700	100	0	0	800	330	0	0
Ait Boubidmane	120	1500	700	0	2320	1080	310	90
Ait Harz Allah	940	1180	600	0	2720	1220	980	210
Bittit	400	40	50	60	550	350	2200	1350
Laqsir	850	3350	180	10	4390	2400	200	130
Total	3030	6170	1530	70	10800	5390	3780	1820

Tableau 41: Superficie irriguée selon les différents systèmes d'irrigation (par hectares). (Source de données : ABHS, 2013)

D'après le tableau 40 ci-dessus, la répartition des superficies irriguées ainsi que les systèmes d'irrigation varient d'une zone à l'autre. Au niveau du plateau de Saïss, le jaillissement de plusieurs sources est très favorable pour l'irrigation, comme le cas du périmètre de la Petite et Moyenne Hydraulique (PMH) de Bittit (Fig. 157), qui est de l'ordre de 2200 ha selon le recensement de l'Agence du Bassin Hydraulique de Sebou en 2013.

Par ailleurs, la commune Laqsir au niveau du plateau d'Ain Taoujdate présente la plus grande zone irriguée au niveau dans la zone d'étude. Il représente environ 4390 ha, dont 3350 ha irrigués par un système d'irrigation localisé (*goutte à goutte*) et 850 ha irrigués par le système gravitaire (*séguías et canaux d'irrigation*). Pour la commune d'Ait Harz Allah, la superficie irriguée de l'ordre de 2720 ha, dont 1180 ha irrigués par le système d'irrigation localisé et 940 ha irrigués par le système gravitaire. Et enfin, la superficie irriguée au niveau de la commune d'Ait Boubidmane est estimée à 2320 ha, dont 1500 ha irrigués par un système localisée et 700 ha irriguée par aspersion.

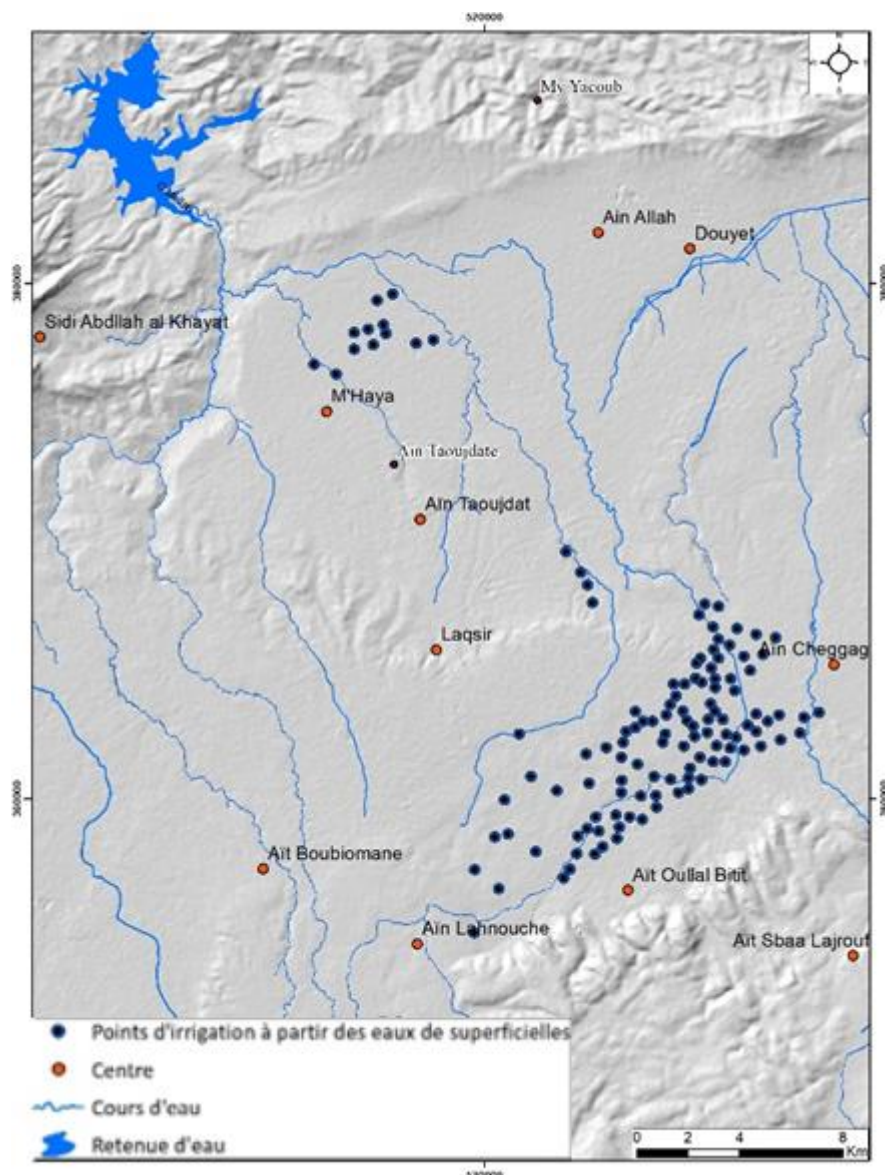


Figure 157: Répartition des points des prélèvements à partir des eaux superficielles

En ce qui concerne les types d'irrigation, la figure 158 présentent les pourcentages des systèmes utilisés. L'irrigation localisée (photo 86) représente 57 % de superficie totale irriguée, suivi par l'irrigation par système gravitaire (photo 87) qui représente 28 % de la surface irriguée dans la zone d'étude. Ce

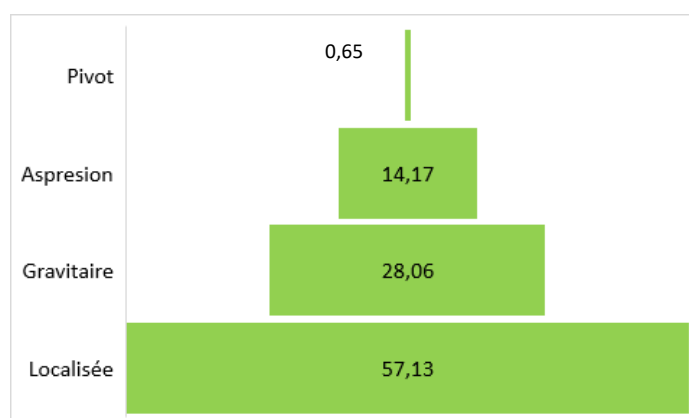


Figure 158: Types des systèmes d'irrigations en %.
(Source : ABHS)

système d'irrigation est garanti grâce l'abondance de plusieurs sources et oueds canalisés, tel que la source de Bittit (Photo 88), Amellal (Photo 89), Ablouz (Photos 90), Rhara (Photo 91), Ribaa, Bourkaiz, Ain Sultane et oued Tizguit...etc. Les systèmes d'irrigation par pivot et par aspersions occupent une petite surface par rapport aux autres systèmes d'irrigation. Ils ne représentent, respectivement, que 14 % et 0,6 %. Ils se localisent dans les fermes les plus développées comme les domaines Royaux de Douiat et Ras El Ma.



Photo 86: Irrigation localisée au niveau d'Ain Taoujdate (25/02/2018)



Photo 87: Irrigation par système gravitaire à la zone de Bittit (cliché : Castel A, 2014)



Photo 88: canal suspendu captant la source de Bittit (14/05/2016)



Photo 89: Segua de la source d'Amellal (25/02/2018)



Photo 90: : Segua d'Ain d'Ablouz (25/02/2018)



Photo 91: Segua de la source d'El Rhara (08/09/2016)

Il faut rappeler que les périodes de sécheresses qu'a connues la zone d'étude ont augmenté la demande en eau d'irrigation depuis les années 1970. La figure 158 présente l'évolution du nombre des puits et forages au niveau du Saïss. Ces points d'eau en passé de 1000 en 1970 à plus de 12000 en 2012.

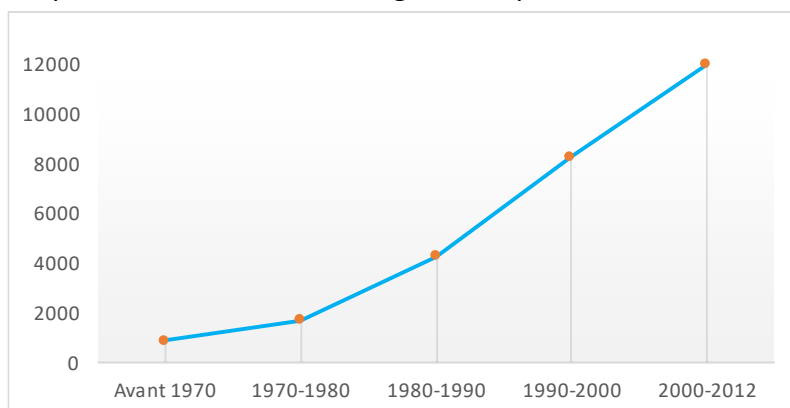


Figure 159: Évolution du nombre des points d'eau au niveau du Saïss (ABHS, 2014)

Face à cette grande demande en eau d'irrigation, le Saïss va bénéficier bientôt d'un grand projet de transfert d'eau d'irrigation (22.000 ha par système gravitaire et 23.000 ha par pompage). La prise d'eau directe sera aménagée dans le barrage M'Dez et le transfert sera effectué par un adducteur de 90km dont 12km de galeries souterraines (Fig. 160). Ce grand projet consiste à transférer l'eau depuis le complexe hydraulique M'Dez-Ain Timedrine, dont la capacité théorique de stockage est estimée à 760 millions de m³.

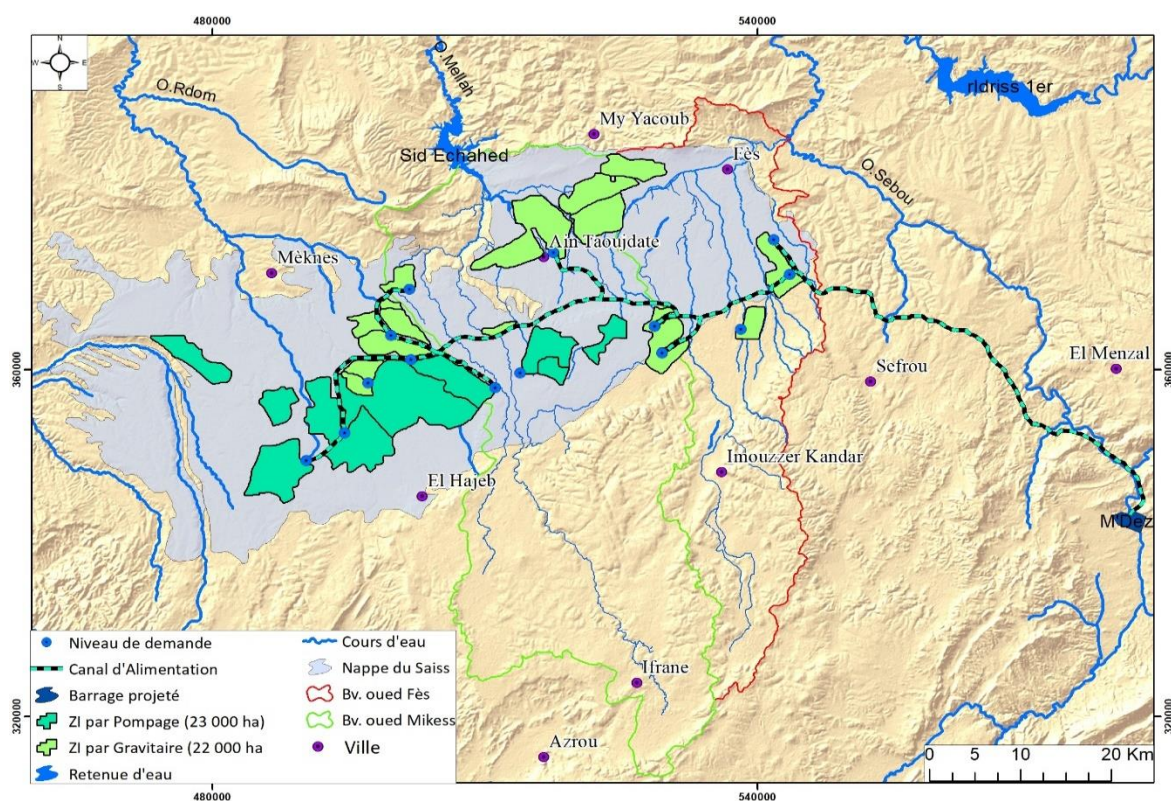


Figure 160: Projet de transfert d'eau vers le Saïss (Source : d'après Ministre de l'Agriculture, 2019)

11.2 Eau potable : plusieurs complexes d'alimentation pour les centres urbains et ruraux

Le Moyen Atlas ainsi que le plateau de Saïss comprennent deux grands systèmes d'alimentation en eau potable pour les villes de Fès et Meknès. Cette dernière est alimentée principalement via les grandes sources du piémont d'El Hajeb (Bittit et Ribaa), tandis que la ville de Fès est alimentée via plusieurs sources et forages au niveau de Ras El Ma et Ain Chkef, ainsi que les eaux de l'oued Sebou qui alimentent la partie Est de la ville de Fès (station d'épuration Ain Nokbi) (Fig. 161).

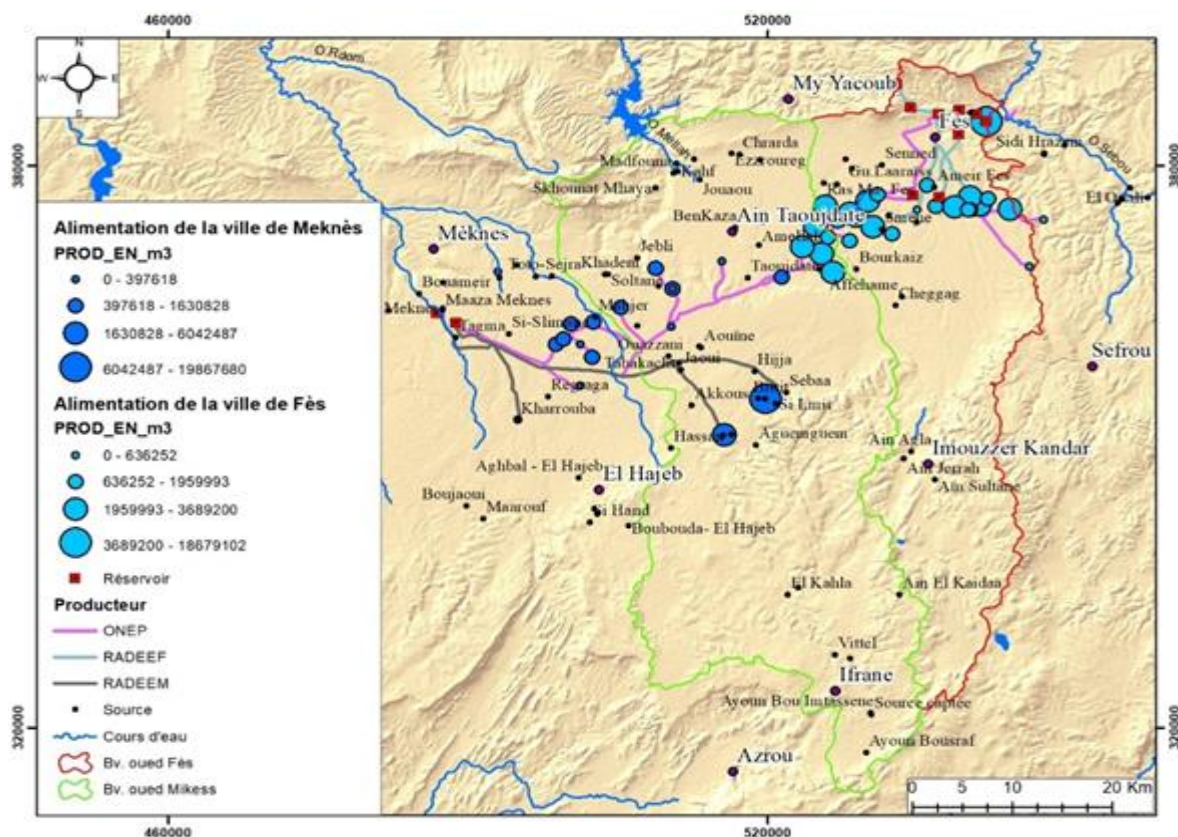


Figure 161: Complexe d'alimentation en eau potable des villes Fès et Meknès. (Données 2004)

En ce qui concerne le monde rural, 152 points de prélèvement sont réalisés pour alimenter les douars et les centres ruraux en eau potable. La gestion et les structures organisationnelles en charge des points de prélèvement utilisés par l'AEP rurale sont multiples. Au niveau du plateau de Fès Saïss, la plupart du point d'eau sont gérés par les communes rurales. Au niveau du plateau d'Ain Taoujdade la plupart des points d'eau sont gérés par les coopératives, qui représentent 46% du nombre des gestionnaires privés (ABHS, 2011).

En conclusion, face à la grande demande en eau potable, les ressources hydriques de la zone d'étude connaissent une surexploitation de plus en plus alarmante. Pour faire face à ce

problème, l'état a fourni beaucoup d'efforts pour diminuer les impacts néfastes de cette surexploitation sur les ressources hydriques au niveau des deux bassins versants. Plusieurs grands projets, cherchant à renforcer la capacité des eaux mobilisables pour l'irrigation, seront bientôt achevés. Ces projets vont surement diminuer la pression sur les ressources en eau et rétablir l'hydrosystème des bassins versants des oueds Fès et Mikkès.

12. Perception des riverains et visiteurs vis-à-vis du paysage hydraulique des oueds traversant la ville de Fès

Ce dernier axe de la thèse vise à analyser la perception des riverains et des visiteurs vis-à-vis de la qualité des paysages hydrauliques des cours d'eau dans la zone d'étude. Pour cette ambition, on va se baser sur le cas des oueds traversant l'agglomération de Fès. Vu la croissance démographique de cette ville, les eaux de l'oued Fès et ses affluents ont été extraites et exploiter pour différents usages. Néanmoins, avec l'expansion horizontale de la ville, des unités commerciales et industrielles ont influencé la qualité du paysage des cours d'eau traversant la ville, qui ont enregistré une dégradation remarquable. Ses eaux sont devenues, par exemple, très polluées et non utilisable, et ce, d'après de nombreuses études récentes, indiquant que l'eau de l'oued Fès n'est plus destinée à la consommation humaine (Koukkal et coll., 2004 ; Perrin et al., 2014). L'étude entamée dans cet axe porte donc sur la façon dont les riverains et les visiteurs de l'oued Fès et ses affluents, aperçoivent ces paysages hydrauliques ? d'une part, et d'autre part, comment évaluer les fonctions assurées par ces cours d'eau et leur valeur emblématique dans leur vie quotidienne ? A cette fin, la méthodologie adoptée dans cette étude s'articule d'abord sur plusieurs démarches dont l'adoption d'un questionnaire, qui a été conçu en collaboration avec la Faculté des Sciences et Techniques de Fès et le Laboratoire d'Hydroscience de Montpellier en France, dans un cadre du programme d'échange "PHC Toubkal-volubilis MA/14/306" du projet « modélisation des flux d'eaux et pollution semi-aride urbanisée ».

12.1 Cadre général et caractéristiques du questionnaire

Pour étudier la perception de l'oued Fès et ses affluents par les visiteurs et les habitants de la ville de Fès, le questionnaire a été finalisé lors d'un stage au sein du laboratoire d'Hydroscience à Montpellier, sous la direction de plusieurs chercheurs. Le questionnaire qui a été adopté comme méthode d'acquisition de données qualitatives et quantitatives et a été

établie en 6 pages (voir l'annexe 9). Un total de 111 questionnaires a été remplis dans les différents lieux de l'oued Fès et ses affluents.

Ce questionnaire est composé de quatre axes, chaque axe contenant plusieurs questions ouvertes et fermées. Le tableau 41 ci-dessous, illustre la structure générale de ce questionnaire.

Axe		Nombre de questions	Nombre de questions fermées	Nombre de questions ouvertes	Total
I	Fréquentation, motifs et accessibilité du lieu	9	9	0	65
II	Paysages, ressources et qualité des eaux	29	21	8	
III	Profil de l'enquête	16	14	2	
IV	Perception des riverains	11	8	3	
Nombre de questionnaires		111			
Tableau 42: structure générale du questionnaire					

- Le premier axe est dédié principalement à la fréquentation, les motifs de visites et les moyens d'accessibilité aux différents sites de l'oued Fès et ses affluents. Il contient un total de 9 questions fermées. L'objectif consiste à étudier, comment les personnes accèdent aux lieux et pour quelles raisons ?
- Le deuxième axe s'intéresse à la perception des paysages hydrauliques de cours eau étudiés. Cet axe contient 29 questions, dont 21 sont fermées et 8 sont ouvertes. L'objectif principale de cet axe, consiste à apprécier comment les personnes perçoivent les paysages ? Aussi, cet axe a été basé sur une planche de huit photos présentant les différents paysages des oueds au Maroc (Propre, Pollué, Aménagé, Sauvage) avec des séries de questions liées à ces photos, et qui sont montrées aux enquêtés qui ont été invités à sélectionner leur choix et la photo préférée, et à choisir des critères de sélection, dans une liste semi-fermée.
- Le troisième axe a été destiné au profil de personnes enquêtées autant bien qu'à leurs situations socioéconomiques. Cet axe contient 16 questions dont 14 questions fermées et deux ouvertes.

- Le dernier axe du questionnaire a été destiné seulement aux riverains. Il a pour objectif de déterminer, leur relation avec l'oued Fès et ses affluents. Cet axe porte aussi sur les habitudes de consommation d'eau et les propositions pour améliorer la qualité de ces paysages. Il contient 11 questions posées aux répondants, dont huit questions sont fermées et trois sont ouvertes.

12.2 Déroulement et remplissage des questionnaires

Cette enquête a été effectuée tout d'abord en français, puis traduite en arabe. Avant le remplissage du questionnaire aux points choisis, il a été testé par nous-même en 10 échantillons, auprès de 10 personnes françaises au sein du Laboratoire Hydrosience à Montpellier et 10 personnes marocaines. L'objectif de ce test, était de réajuster et d'améliorer la qualité des questions, afin d'atteindre l'objectif visé.

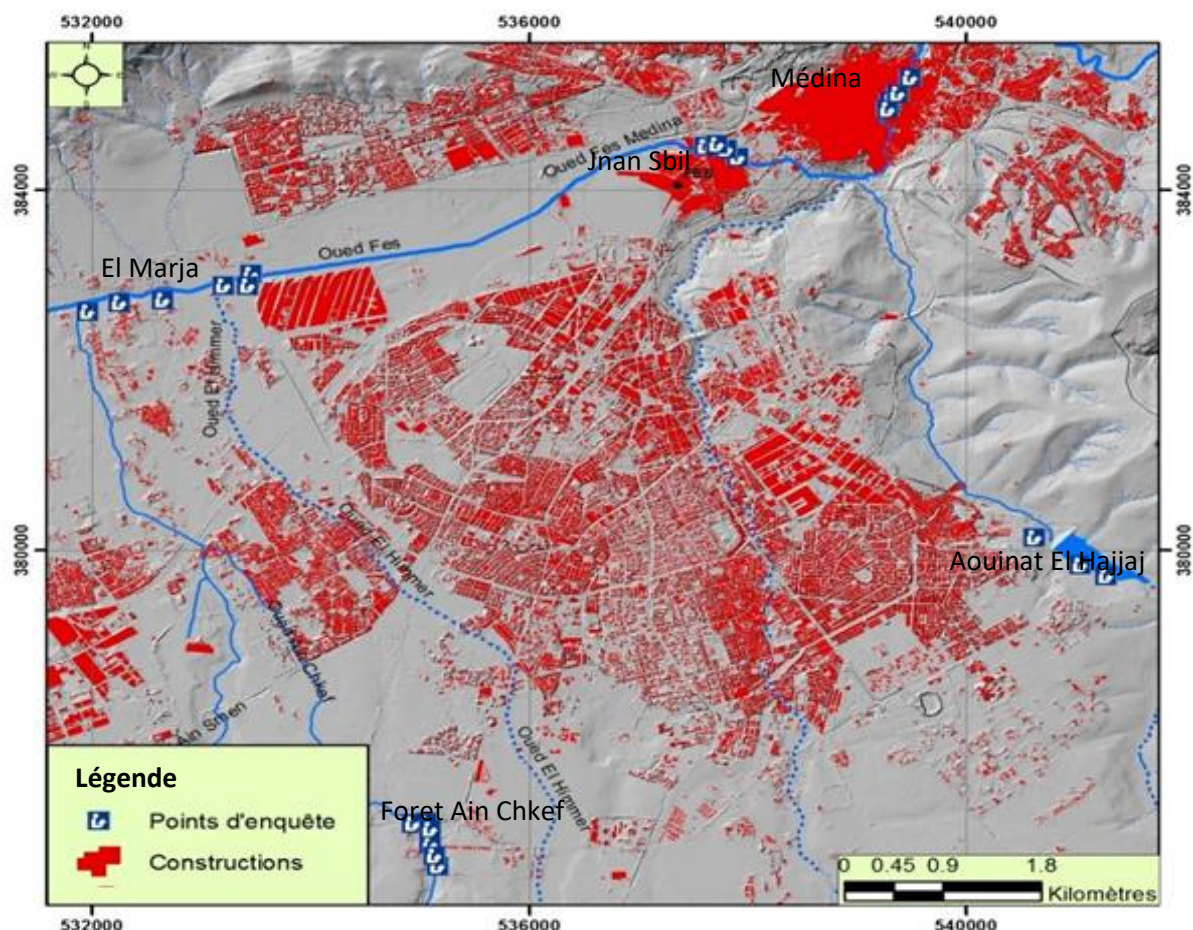


Figure 162: Localisation des cinq sites d'enquêtes réalisés

Le choix des zones d'enquête est justifié par plusieurs critères. Tout d'abord, il a favorisé les zones les plus fréquentées par la population, les zones accessibles et les plus sûres. Signalons

aussi que les points d'enquêtes choisis se situent à moins de 100m des berges des oueds en question, pour que les répondants puissent voir la situation et l'état réel de chaque site choisis. La figure 162 ci-dessus présente la localisation des points d'enquêtes sélectionnées. Cinq points d'enquêtes ont été choisis. Ils sont répartis au niveau du cours d'eau principal, ainsi que quelques affluents tels que l'oued Ain Chkef et l'oued Boufekrane (Barrage El Gaada).

- Le premier point d'enquête est au niveau de la médina de Fès (photo 93), dans la place R'Cif et Bab Jdid.
- Le deuxième point d'enquête se localise au niveau des jardins Jnan Sbil à l'Ouest de la médina de Fès (photo 94).
- Le troisième point se situe à l'ouest de la ville de Fès au niveau d'El Marja, près du quartier industriel Doukarat (photo 95).
- Le quatrième est localisé au sein de la forêt d'Ain Chkef au niveau de l'affluent oued Ain Chkef (photo 96).
- Le dernier point d'enquête se situe au niveau du périphérique Sud-Est de la ville de Fès, au barrage El Gaada sur l'oued Boufekrane (photo 97).



Photo 92: Place R'Cif à l'entrée de la médina (2015)



Photo 93: Jardins de Jnan Sbil (2015)



Photo 94: El Marja à l'oued Fès amont (2015)





Photo 95: Foret Ain Chkef (2015)



Photo 96: Barrage El Gaada sur l'oued Boufkrane (2015)

L'enquête s'est déroulée au niveau des cinq endroits choisis pendant une période de 15 jours. Chaque point d'enquête a été visité au moins en deux jours différents. Au total, 111 questionnaires ont été remplis. Les réponses ont été dépouillées sur le logiciel IBM SPSS®. Les résultats de cette enquête sont présentés ci-dessous.

12.3 Résultats de l'enquête

Les cours d'eau ont été depuis toujours des environnements attractifs. Dans ce premier volet de l'enquête, on va essayer d'approcher les raisons pour lesquelles l'oued Fès et ses affluents sont fréquentés. En ce qui concerne le site d'El Marja : 38% des enquêtées viennent pour la pêche et 23% déclarent qu'ils sont là pour le pique-nique, tandis que 12% sont seulement de passage. Au niveau de la forêt d'Ain Chkef, 47% fréquentent l'oued Ain Chkef pour faire des pique-niques, 13% pour les promenades et 3% pour les activités sportives. Le barrage El Gaada présente le site le moins fréquenté, notamment par les ouvriers des chantiers avoisinants (83%), ainsi que les pêcheurs (17%). Pour le site de Jnan Sbil, la moitié des visiteurs sont venus pour faire un pique-nique, 14% pour préparer les examens et 10% sont seulement de passage.

Dans le deuxième volet, on a essayé de savoir si les riverains et les visiteurs de l'oued Fès et ses affluents sont conscients des différentes mutations que connaît ces paysages hydrauliques. Au niveau d'El Marja, 73% des répondants révèlent qu'ils sont au courant des changements des paysages. La conscience des enquêtés au niveau de la médina (95%) et Jnan Sbil (86%) est encore plus importante, par rapport aux enquêtés au niveau du Barrage El Gaada (67%) et Ain Chkef (43%) (Fig. 163).

En ce qui concerne la perception de la qualité des eaux des oueds en question, la majorité des réponses ont été surprenantes ! En effet, seulement 26% disent que le cours d'eau de l'oued Fès au niveau de la médina est pollué. Le niveau d'enseignement joue un rôle déterminant dans la perception des répondants et cela explique ces réponses qui sont parfois choquantes. En réalité l'état général de l'oued Fès varie d'un point à l'autre, ce qui explique

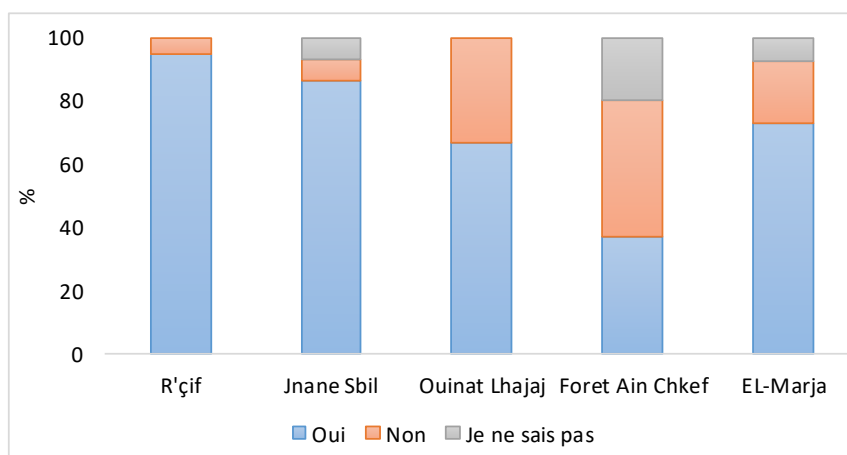


Figure 163: Perception des mutations de paysages hydrauliques

la diversité des réponses obtenues d'une zone à l'autre. Pour le site de R'Cif, 65% des personnes enquêtées disent que la qualité des eaux est dégradée.

Le quatrième axe de cette enquête vise à comprendre la relation entre les paysages et les personnes enquêtées. Le paysage, peut être considéré, comme un moyen d'associer les sociétés à la gestion des écosystèmes (Cottet, 2010). Selon la Convention Européenne du Paysage en 2000, il est défini comme « une partie de territoire telle que perçue par les populations, et dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ ou humains et de leurs interrelations ».

Pour évaluer la relation entre les enquêtés et les paysages dans les cinq sites, une autre méthodologie a été appliquée dans notre enquête. Il s'agit d'une enquête par photo-questionnaire. Cette technique d'enquête consiste à présenter une série de photographies à partir desquelles les personnes interrogées doivent émettre un jugement (Cottet, 2010). Les quatre questions liées aux photo-questionnaires visent à apprécier comment les enquêtés perçoivent les paysages de plusieurs oueds au Maroc et qui sont présentés dans la planche photo ci-dessous (Photo 97 à 104).



Photo 97: Oued Fès au niveau de Bab Jdid



Photo 98: Oued Bouragrag à Rabat



Photo 99: Oued Fès au niveau de Jen Chfour

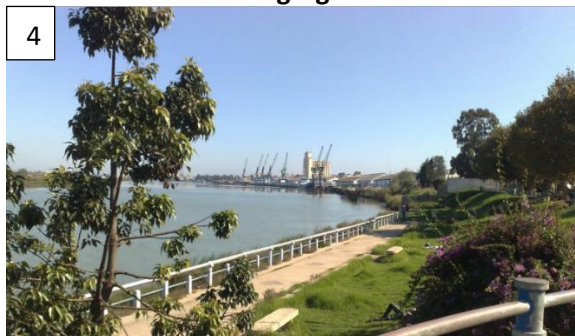


Photo 100: Oued Sebou à Kénitra



Photo 101: Oued Fès après la place de R'Cif



Photo 102: Oued Fès à la place de R'Cif



Photo 103: Oued Ain Smen à Fès



Photo 104: Oued Oum Rabia à Azemmour

Les résultats obtenus à partir de cette enquête ont confirmé que les répondants utilisent, avant tout, des critères visuels pour estimer la qualité des paysages de l'oued Fès et ses affluents. Dans un autre sens, on demande aux personnes enquêtées, si l'on vous donne des ressources financières suffisantes pour réaliser un projet sur l'oued Fès et ses affluents, que

feriez-vous ? Les réponses obtenues ont été traitées selon chaque personne enquêtée, en se basant sur les mots clés fréquents dans leurs réponses (Fig. 164) puis regroupées en quatre projets (Fig. 165). Le projet le plus proposé est en relation avec la protection de l'environnement et le reboisement des berges 32%, il est destiné à la création des beaux endroits avec des beaux paysages verts et propres. Le deuxième projet le plus proposé est liée à l'amélioration de la qualité des eaux à partir des stations d'épurations, de filtrations et de traitements des déchets solides et liquides (29%). La troisième catégorie de projets est celle liée aux aménagements, comme la canalisation des oueds en question (29%). La quatrième proposition a une vocation économique liée à la création d'aires touristiques et le traitement des eaux pour l'irrigation.

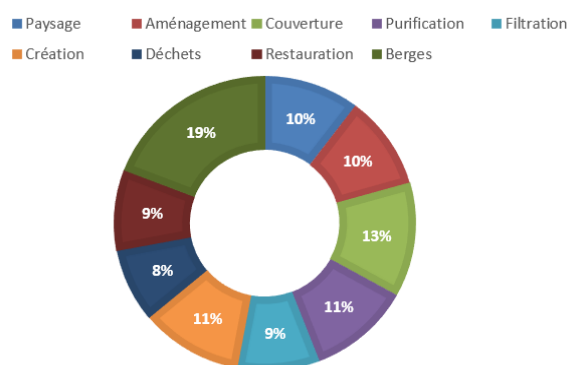


Figure 164: Les mots les plus fréquents dans les réponses liées aux projets proposés

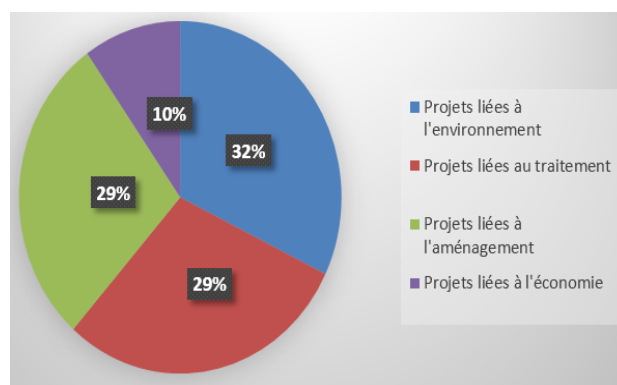


Figure 165: Les quatre projets proposés par les enquêtés

En conclusion, les résultats obtenus par ce questionnaire confirment que certaines variables relatives à l'aspect de l'eau expliquent, en grande partie, les préférences de chaque site choisi pour cette enquête. Ces résultats permettent de prendre en compte le public comme acteur dans la gestion participative et la restauration des zones, où l'eau joue un rôle dans la qualité des paysages et le bien-être de la population. En effet, il est désormais bien admis que la gestion des écosystèmes doit reposer sur un projet de société, prenant en compte les différentes attentes sociales (Blandin et Bergandi, 2000 ; Mouratiadou et Moran, 2007 ; Nassauer et al., 2001). D'un autre sens, l'adhésion du public, constitue en fait un facteur déterminant du succès d'un plan de gestion (Giordano et al., 2005) et qui demande de porter une attention particulière à la perception du public.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Comme il a été déjà signalé, il est impossible de cerner les caractéristiques de l'hydrosystème des bassins versants des oueds Fès et Mikkès sans comprendre leur fonctionnement hydrogéologique. Grâce à leur contexte structural, le potentiel hydrogéologique des deux bassins versants limitrophes est d'une très grande importance. Les terrains très perméables au niveau des causses du Moyen Atlas ont favorisé la création de plusieurs nappes hydrogéologiques de tailles et volumes différents. Malheureusement, les aquifères karstiques du Moyen Atlas, ainsi que les nappes Plio-Quaternaire et Liasique au Saïss sont de nos jours très vulnérables face aux variations climatiques et aux pressions anthropiques. L'analyse des fluctuations piézométriques de la nappe phréatique de Saïss a démontré l'influence de ces contraintes sur la stabilité de ce potentiel hydrique souterrain. En effet, les coefficients de détermination obtenus à partir de la comparaison entre les apports pluviométriques et le niveau piézométriques donnent des conclusions témoignant la relation intrinsèque entre les tendances pluviométriques et le volume de la nappe étudiée. Par ailleurs, les pompages de ces eaux ont fortement affecté leurs réserves hydriques.

Par ailleurs, l'échange entre les aquifères souterraines et les écoulements de surface se fait via plusieurs sources de types et productivités différentes. Ces sources _présentées dans ce chapitre_ sont à l'origine de plusieurs situations hydrogéologiques (débordement, résurgence, artésienne, trop-plein, mixte...). Leurs régimes hydrologiques est assez variable entre l'amont, le piémont et le Saïss. Cette conclusion a été dégagée à partir de l'analyse de leurs débits à l'échelle annuelle et saisonnière. Ces débits sont également liés aux fluctuations des apports pluviométriques, mais d'une façon différente d'une source à l'autre. Certaines sources sont très sensibles aux pluies (sources Aguemguem, Atrous, Ain Sultane...) tandis que d'autres, ont un régime régulier et peu sensible aux apports pluviométriques (Sources Bittit, Ribaa, Akkous...). Les sources du Saïss sont celles qui ont été le plus affectées par les effets de la sécheresse. Plusieurs sources sont complètement séchées (sources Ain Cheggag, Ain Taoujdate, Bergama Sghira, Kharrouba, Zeroureg...) depuis le début des années 1990. En ce qui concerne la qualité des eaux de quelques sources, le phénomène de turbidité pose un grand problème, notamment pour les sources de piémont d'El Hajeb qui alimentent la ville de Meknès en eau potable. Grâce aux résultats de quelques études récentes, on a conclu que ce phénomène est lié aux épisodes pluvieux de forte intensité, qui cause une forte érosion à la

surface, avant que ces eaux troublent s'infiltrent et surgissent sous forme de sources à grande turbidité, tel que les sources Bittit et Ribaa.

En ce qui concerne l'influence du facteur humain sur l'hydrosystème des bassins étudiés ; l'exploitation des ressources en eau est de plus en plus importante. L'irrigation des dizaines de milliers de terrains agricole presse sur les eaux souterraines et de surface. Mais grâce au projet de transfert depuis le complexe hydraulique M'Dez- Ain Timedrine, la demande en eau d'irrigation sera plus rationnelle. Sur le plan de l'eau potable, les projets de pompages et captages des eaux de surface, assurent une alimentation infaillible au niveau de toutes les agglomérations urbaines et centres ruraux de la zone d'étude.

Enfin, le dernier axe de ce chapitre s'est intéressé à la perception des paysages hydrauliques des cours d'eau, en se basant sur l'oued Fès et ses affluents. Cette étude s'est basée sur un questionnaire cherchant à comprendre le degré de conscience des personnes fréquentant les oueds au niveau de la ville de Fès. Les conclusions de cette étude sont très intéressantes et peuvent aider à la prise de décision, concernant les projets visant d'améliorer les espaces hydrauliques des oueds traversant la ville de Fès comme exemple.

En général, à partir de ce dernier chapitre, relatif aux comportements hydrogéologiques, on peut dire que l'hydrosystème des bassins versants des oueds Fès et Mikkès est très conditionné par les eaux souterraines. La majorité des eaux précipitées en amont sont infiltrées dans les différentes nappes hydrogéologiques, qui réalimentent les écoulements de surfaces via plusieurs sources de types et productivités différentes. Enfin, le facteur anthropique influence très profondément ce hydrosystème fragile, surtout à partir de l'exploitation des eaux d'irrigations qui bouleversent complètement le bilan hydrique dans les deux bassins versants étudiés.

CONCLUSION GENERALE

De nos jours, le climat connaît de nouvelles tendances très visibles et leurs impacts menacent de plus en plus l'équilibre de plusieurs régions au monde. Le Maroc, par son appartenance au domaine méditerranéen, n'échappe pas aux effets de ces nouvelles tendances. Que ce soit les sécheresses ou les inondations, les risques hydroclimatiques menacent de plus en plus les différents territoires du Royaume. Comme il a été mentionné dans l'introduction de cette thèse, le Maroc a été classé, en 2019, parmi des pays connaissant un stress hydrique élevé (*High baseline water stress*) et sur le fond de paramètres actuelles, plusieurs projection prévoit que le Royaume connaîtra un niveau de stress hydrique extrêmement élevé d'ici 2040. Face à cette situation, la majorité des hydrosystèmes marocains peuvent connaître des bouleversements très profonds, dont les impacts peuvent être catastrophes sur les milieux naturels et les activités humaines.

Parmi les hydrosystèmes complexes au niveau national, le bassin de Sebou présente un cas très intéressant. Malgré que ses ressources hydriques soient très abondantes (1/3 du volume des écoulements superficiels et 25% du potentiel hydrique mobilisable du Maroc), il est très vulnérable face aux nouveaux changements climatiques. Ce bassin a fait l'objet de plusieurs études, cependant, le fonctionnement hydrologique de certains de ces affluents sont peu connus. Parmi ces bassins versants, il y a les deux bassins versants limitrophes des oueds Fès et Mikkès. Plusieurs études se sont intéressées à quelques aspects et zones relatives à zone, mais, rares sont les études qui se sont intéressées à ces deux bassins versants dans leur globalité. Ce choix de ces derniers a présenté un grand challenge, du fait qu'ils sont très peu jaugés ainsi que leur situation complexe appartenant à trois unités morfo structurales très différentes.

Pour analyser l'hydrologie de ces deux bassins versants limitrophes, cette thèse s'est basée sur l'études de tous les facteurs déterminants les comportements hydrologiques des bassins versants, en se basant sur l'héritage paléogéographiques, les caractéristiques physiographiques, le facteur climatique, les régimes hydrologiques de surface, les comportements hydrogéologiques et enfin le facteur anthropique. En termes de résultats obtenus dans cette thèse, on souligne les conclusions suivantes :

Les deux bassins versants des oueds Fès et Mikkès sont la résultante d'une longue histoire paléogéographique. Ils sont passés d'un hydrosystème marin, puis lacustre pour devenir purement continental. Leurs caractéristiques physiographiques sont très complexes. En effet, le fait qu'ils drainent trois unités morphostructurales différentes, explique l'hétérogénéité et la complexité de ces facteurs physiographiques. La principale conclusion dégagée à partir de l'analyse de ces facteurs physiographiques est résumée dans le fait que la morphométrie, la topographie, l'hydrographie, la lithologie et l'occupation du sol des deux bassins versants sont tous des facteurs amortissant leur réponse hydrologique. Par conséquent, on a estimé que les régimes hydrologiques de ces deux bassins versants ne sont pas directement conditionnés par les sollicitations climatiques. Cette hypothèse a été confirmée dans le troisième chapitre.

Le facteur climatique joue un rôle primordial dans la détermination des hydrosystèmes. L'étude de ce facteur a été appuyée sur 18 postes et stations climatiques couvrant la totalité des deux bassins versants ainsi que leurs bordures. La critique de ces données a fait l'objet d'un travail fastidieux afin de fonder cette analyse sur des données crédibles. Parmi les principales conclusions concernant ce volet, on a démontré que l'amont reçoit le double de la lame d'eau précipitée en aval. La spatialisation des apports pluviométriques annuels et saisonniers donne des indices concernant la répartition des ressources hydriques au niveau des deux bassins versants étudiés. Par ailleurs, grâce aux méthodes statistiques, on a pu confirmer que la zone d'étude a connu effectivement plusieurs tendances pluviométriques sèches et humides, qui ont profondément influencées la disponibilité des ressources hydriques dans les deux bassins versants étudiés. En ce qui concerne les températures, grâce à plusieurs stations représentatives, il a été mis en évidence que le contraste thermique est très frappant entre l'amont et l'aval. Ce facteur a joué un rôle déterminant concernant l'évapotranspiration qui augmente d'avantage les contrastes des surplus et des déficits hydriques entre l'amont et l'aval. Ces résultats nous ont insisté à poser une question sur l'impact de ces bilans hydriques sur les ressources en eau de surface, le troisième chapitre de cette thèse répond à cette question.

Dans le troisième chapitre, on s'est intéressé à l'étude de l'hydrologie de surface. Face à l'indigence des données hydrométriques, le recours aux méthodes et techniques de jaugeage a été indispensable afin de produire des données concernant les écoulements de surface en différentes situations hydrologiques (étiages et hautes eaux). Grâce aux six compagnes de

jaugeage effectué entre 2014 et 2018, plusieurs résultats ont pu être produits concernant l'évolution des débits de l'amont vers l'aval (profil hydrologique) ainsi que les rendements des différents sous-bassins versants jaugés à partir de leurs débits spécifiques ($l/s/km^2$). Concernant les profils hydrologiques, quoique l'amont soit le plus arrosé, ses écoulements de surface sont moins importants par rapport à l'aval. Cette situation est due à l'influence sur terrains carbonatés au Moyen Atlas. Cette donnée lithologique est aussi déterminante concernant la productivité hydrologique des sous-bassins versants. En effet, les débits spécifiques les plus importants sont localisés au niveau du plateau de Saïss, grâce aux résurgences abondantes à ce niveau et notamment au dir des causses du Moyens Atlas.

Sur le plan hydrogéologique, les deux bassins versants se caractérisent par trois aquifères de tailles et caractéristiques différentes. Ces dernières connaissent une grande fluctuation, notamment la nappe phréatique Plio-Quaternaire de Saïss. À partir des données piézométriques dans les différentes parties du plateau de Saïss, on a pu conclure que cette fluctuation est très influencée par les apports pluviométriques et les pressions anthropiques. La recharge et la vidange de ces nappes a mérité une attention particulière dans ce travail. Concernant la vidange, elle se fait via plusieurs sources de types différents (sources de débordement, d'émergence, mixte, trop-plein et artésiennes). Certaines de ces dernières se caractérisent par un régime hydrologique stable, tandis que d'autres sont très irrégulières. Cela est expliqué par leur relation avec les apports pluviométriques. Par ailleurs, il faut rappeler que ces potentiels hydrogéologiques subissent une exploitation intense pour garantir l'irrigations des milliers d'hectares de terrains agricoles, ainsi que pour satisfaire l'alimentation en eau potable des centres urbains et ruraux dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès. Enfin, la perception de ces paysages hydrauliques relevés le niveau de conscience, des riverains et visiteurs des cours d'eau au niveau de la ville de Fès (comme étude de cas), par rapport aux enjeux environnementaux et économiques en relations avec ces paysages hydrauliques. Les résultats obtenus à partir de cette étude peuvent être de très grandes utilités pour la prise de décision au niveau des futurs projets de gestion de ces espaces fragiles.

Enfin, le quatrième chapitre s'intéresse à la perception des paysages des différents sites de l'oued Fès et ses affluents. Nous rappelons que cette étude de la perception a été basée sur un questionnaire cherchant à comprendre le degré de conscience la population de la ville de Fès

ainsi que les visiteurs de cette ville. Les résultats obtenus de cette étude sont très intéressants et peuvent aider à la prise de décision, concernant les projets visant d'améliorer les espaces hydrauliques des oueds traversant la ville de Fès comme exemple. D'autre part, ces résultats permettent de prendre en compte le public comme acteur primordial dans la gestion et la discision participative et la restauration des zones, où l'eau joue un rôle Esthétique dans la qualité des paysages et le bien-être de la population. Finalement, il est désormais bien admis que la gestion des écosystèmes doit reposer sur un projet de société, prenant en compte les différentes attentes sociales.

En conclusion, pour répondre aux différentes questions de la problématique générale de cette thèse, la démarche suivie a été basée sur une analyse superposée des différents niveaux des facteurs influençant les hydrosystèmes des bassins versants. Cette méthode classique, mais indispensables, demande la mobilisation d'un bon savoir-faire au niveau de plusieurs disciplines associées à la géographie physique et humaine. Par ailleurs, pour atteindre un tel objectif, la méthodologie adoptée doit être basée sur tout un arsenal de données précises, et parfois couteuses. Dans cette conclusion, on ne peut dire que les objectifs tracés sont atteints. Cette étude de l'hydrologie des deux bassins versants des oueds Fès et Mikkès n'est qu'une contribution pour comprendre les paramètres qui contrôlent leurs équilibres hydrologiques. Plusieurs questions cruciales attendent des réponses ! Par exemple, après la concrétisation du projet du transfert d'eau à partir du complexe hydraulique M'Dez – Ain Timedrine, est-ce-que l'hydrosystème de Saïss pourra se rétablir et ses sources se régénéreront encore une fois ? Cette question et autres trouveront de nouvelles réponses dans le futur.

BIBLIOGRAPHIE

- ABHS (2010). Etude de mise en place d'un dispositif de prévision et d'alerte aux crues pour la ville de Fès. Etude hydrologique. Rapport de l'Agence du bassin hydraulique de Sebou, Fès, 80 p.
- ABHS (2011). Etude d'aménagement des cours d'eau pour la protection contre les inondations dans la zone périphérique Sud de la ville de Fès, rapport de l'Agence du bassin hydraulique de Sebou, Fès.
- African Geophysical Company (AGC). (1988). Geophysical synthesis of basins of Fez- ABHS (2005). Etude d'exécution de l'aménagement des cours d'eau pour la protection de la ville de Fès contre les inondations. Sous-mission 1-1 : Validation des aménagements retenus. Marché N° : 37/2005, Fès p100.
- African Geophysical Company (AGC). (1988). Geophysical synthesis of basins of Fez-Meknes and Boudnib-Errachidia. UNDP / DTCD Project. MOR 86/004.
- Aït Brahim L. (1991). Tectonique cassante et états de contraintes récents au Nord du Maroc. Contribution à l'étude du risque sismotectonique, Thèse de doctorat Es Sci., Rabat, 223 p.
- Aït Brahim L., Chotin P. (1984). Mise en évidence d'un changement de direction de compression dans l'avant pays rifain au cours du tertiaire et du Quaternaire. Bull. Sec. Géol. France, (7), t.26, N°4, pp. 681-691.
- Aït Brahim L., Chotin P., Ramdani M., et Tadili B. (1989). Carte sismotectonique du Maroc septentrionale au 1/1.000.000. Coll. Géol. Franco-Marocain, Strasbourg, 24-26 Mai, p.8.
- Aldegheri M. (1979). Manuel d'hydrométrie, volume IV : mesure des débits à partir des vitesses. Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer, Paris, France. 313 p.
- Alfonso S., Grousset F., Massé L., Tastet J. P. (2001). A European lead isotope signal recorded from 6000 to 300 years BP in coastal marshes (SW France). Atmospheric environment 35, 3595-3605.
- Alibou J. (2002). Impact des changements climatiques sur les ressources en eau et les zones humides du Maroc. Ecole Hassania des travaux publics (EHTP).
- Ameer F., Kuper M., Dugue K. (2017). L'exploitation des eaux souterraines dans le Sais : la course que certains abandonnent. Alternatives Rurales (6) .13p
- Amraoui F., Razack M., & Bouchaou L. (2004). Behaviour of a karstic spring subjected to a long drought period: Bittit spring (Morocco). Comptes Rendus - Geoscience, 336(12), 1099–1109. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.03.016>
- Amraoui F., Razack M., Bouchaou L. (2003). Turbidity dynamics in karstic systems: example of Ribaa and Bittit springs in the middle atlas (Morocco). Hydrol Sci J 48:971–984
- Amraoui F., Razack M., Bouchaou L. (2005). Impact of a long drought period on a large carbonate aquifer: the Liassic aquifer of the Sais plain and Middle Atlas plateau (Morocco). In: Regional hydrological impacts of climate change: hydroclimatic variability. IAHS Publ.296. IAHS, London, pp 184–193.

- Amyay M., Ghaouti 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.
- Anctil F., Rousselle J., Lauzon N. (2005). Hydrologie : cheminement de l'eau. Presses internationales polytechnique. 317 p.
- Arboleya ML., Teixell A., Charroud M., Julivert M. (2004). A structural transect through the High and Middle Atlas of Morocco. J Afr Earth Sci 39 :319–327
- Archambault C., Combe M., Ruhard, J.P. (1975). Le plateau des phosphates in ressources en eau du Maroc. Notes et Mém. Serv. Géol. Rabat XI231, 232-258.
- Arriaza M., Cañas-Ortega J. F., Cañas-Madueño J. A., Ruiz-Aviles P., (2004). Assessing the visual quality of rural landscapes, Landscape and Urban Planning, vol. 69, p. 115-125.
- Arts I., Sary M. (2000). Cartographie des débits d'étiage : application au bassin de la Meurthe. Revue Géographique de l'Est. Vol. 40 / 1-2, 14 p.
- Aussenac G. (1970). Aperçu du rôle de la forêt sur l'économie de l'eau. La revue forestière française, T. 22, n° 66
- Bahir M., Mennani A. (2000). Problématique de la gestion des eaux souterraines au Maroc. Estudios Geol., 58 : 103-108
- Bahzad H. (1982). Recherches Hydrologiques et Hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens. Liban, Syrie et Maroc. Karstologia, n° 2, 67 p.
- Batton-Hubert M., Momoun D. (2000). Modélisation « emboîtée » et analyse spatiale du comportement hydrodynamique d'un système alluvial. Cas des périodes de crue de la Loire » Revue internationale de géomatique Volume 10_n° 3-4/2000, « SIG, aménagement du territoire et environnement ; PP 313-334 » Edition Hermès science publication ; France.
- Beaulieu C., Ouarda T., Seidou O., Boulet G., Yagouti A. (2007). Etude comparative d'homogénéisation des précipitations. Rapport de recherche N° R-907, 107 p.
- Belhassan K., (2011). Comportement hydrologique, hydrogéologique et hydrodynamique du bassin versant de l'Oued Mikkès en amont du barrage de Sidi Echahed (Maroc), Thèse Doct. National. Univ. Sidi Mohammed Ben Abdellah. Fès, Pp: 216.
- Benaabidate L., Fryar AE. (2010). Controls on ground water chemistry in the central Couloir Sud Rifain, Morocco. Groundwater 48:306–319
- Benassi M. (2008) Drought and climate change in Morocco: analysis of precipitation field and water supply. In: López-Francos A (ed) Drought management: scientific and technological innovations. Options Méditerranéennes : Série A : Séminaires Méditerranéennes, no. 80. CIHEAM, Zaragoza, pp 83–86
- Benjbara A. (1987). Observations sur les sources de la plaine de Fès-Meknès. Article de la Revue eau et développement. Edition DRPE. P31 à 37.
- Benjbara A., Rhaouti S. (1989). Approche des infiltrations dans les Causses du moyen Atlas Septentrional : Application d'un modèle global à réservoirs. Rapport DRPE. (Inédit).

- Bentyeb R. (1977). The middle atlasic cause, in water resources of Morocco. Volume 3, atlantic and southern atlasic domains, notes and memoirs, geological service, n ° 231, pp.37-66.
- Beven K. (1983). Surface water hydrology - runoff generation and basin structure. Reviews of geophysics and space physics 21(3), pp. 721–730.
- Beven K., Binley A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. Hydrological processes, Vol. 6. 279-298 pp
- Beven K., Germann P. (1982). Macropores and water flow in soils. Water Resources Research 18(5), pp. 1311–1325.
- Blandin P., Bergandi D., (2000). A l'aube d'une nouvelle écologie ? La Recherche, vol. 332, p. 56-59.
- Bodian A., Dacosta H., Dezetter A. (2011). Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. Revue ; géographie physique et environnement. Volume 5 p. 107-124.
- Bodian A., Dacosta H., Et Dezetter A., (2011) - Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, vol. V, p. 116-133.
- Bodian A. (2011). Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat, Université Cheikh AntaDiop de Dakar (Sénégal), 288 p.
- Bodian A., Dacosta H. Et Dezetter A. (2011) - Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, vol. V, p. 116-133.
- Bodian, Ansoumana. Diop, Lamine. Panthou, Jeremy. Dacosta, Honoré. Deme, bdoulaye. Dezetter, Alain. Ndiaye, Pape Malick. Diouf, Ibrahima. Vischel, Théo. (2020) Recent Trend in Hydroclimatic Conditions in the Senegal River Basin. Water, 12.
- Boiten W. (2000). Hydrometry. Francis and Taylor Publishers
- Bouchaou L., Mangin A., Chauve P. (2002). Turbidity mechanism of water from a karstic spring: example of the Ain Asserdoune spring (Beni Mellal Atlas, Morocco). J Hydrol 265 : 34–42
- Bouchaou L., Michelot J.L., Chauve P., Mania J., Etmudry J. (1995). Apports des isotopes stables à l'étude des modalités d'alimentation des aquifères du Tadla (Maroc) sous climat semi-aride. C.R. Acad. Sci. Paris, t.320 série IIA, 95-101.
- Bouignane A., Serrhini N. (2015). Enjeux et perspectives d'une gestion durable de la nappe de Fez-Meknès. Alternatives Rurales (3), 6 p.
- Boulton A. J., (1999). An overview of river health assessment: philosophies, practice, problems and prognosis, Freshwater Biology, vol. 41, n° 2, p. 469-479
- Boyer, J.F. (2002). Software Khronostat chronological series of statistical analysis. IRD UR2, Program 21 FRIEND AOC, Team UMRGBE Hydrology, University of
- Bravard et Petit, (1997). Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris. 180

- Brett A. Howell., Alan E. Fryar., Benaabidate L., Bouchaou L., Farhaou M. (2019). Variable responses of karst springs to recharge in the Middle Atlas region of Morocco. Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature
- Brody S. D., Highfield W., Peck M. B., (2005). Exploring the mosaic of perceptions for water quality across watersheds in San Antonio, Texas, *Landscape and urban planning*, vol. 73, p. 200-214.
- Brunet-Moret Y. (1971). Etude de l'Homogénéité des Séries Chronologiques des Précipitations annuelles par la Méthode des Doubles Masse. » In *Cah. O.R.S.T.O.M. Vol. II n°3*, Paris, pp. 147-165
- Cairns J. J., (1995). Ecosocietal restoration. Reestablishing humanity's relationship with natural systems, *Environment*, vol. 37, n° 5, p. 4-9 ; 30-33.
- Callède J., Kosuth P., Guyot J.L., Guimarães V. (2000). Discharge determination by acoustic doppler current profilers (ADCP): a moving bottom error correction method and its application on the river Amazon at Obidos. *Hydrological Sciences Journal*, 45(6) : 911-924.
- Caravello G.U., Conard S.G, Farina A., Ferchichi A., Taïqui L. (2009). *Mediterranea, Serie de Estudios Biologic, Epoca II N°20. I.S.S.N.: 0210-5004. Departamento de ecologia. Fac. De Ciencias. Universidad de Alincante, Ap. 99- 03080 Alicante. Espana*
- Castany g., (1998). *Hydrogéologie. Principes et méthodes*. Dunod, paris. 237 p.
- Castellani C., (1983). Régionalisation du gradient pluviométrique dans les Alpes du Nord. *Diplôme de Mémoire de Maîtrise. Institut de Géographie d'Aix. Dact. 99 pages*
- Chamayou J., Combe I., Bernard & Leclerc C. (1975). Le bassin de Meknès-Fès et le couloir de Fès-Taza, (in *ressources en eau du Maroc, plaines et bassins du Maroc atlantique*). Notes et Mém. Serv. géol. Maroc, tome 2, n°231, 41-71.
- Chamayou J., Combe M., Gentier B., Leclerc C. (1975). The Meknes-Fes basin, Morocco water resources, Volume 2, plains and basins of Atlantic Morocco, *Notes and Memories of the geological service, Rabat, Morocco*, pp. 41-71
- Chapman & Hall UK., Hubert P. & Carbonnel, T. P. (1987). Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'ouest. 1. *Hydrol.* 95, 165- 183.
- Chapon G. (1964). Etude hydrogéologique du bassin de Fès-Meknès. *Rapport DRPE (inédit)*, 92 p.
- Chapon G. (1960). Etude hydrogéologique dans les Ternagha et les Ait Youssi. *Rapp. Inéd. arch. MTPC/DH/DRE*, 3 pp.
- Chapon G. (1960). Etude hydrogéologique des sources thermo-minérales de Sidi-Harazem. *Rapp. inéd. arch. MTPC/DH/DRE*, 15 pp. 2 fig, 3 phol. 3 plans.
- Chapon G. (1962). La nappe captive profonde du bassin de Fès-Meknès. *Rapp. Inéd. arch. MTPC/DH/DRE*, 16 pp., 1 tabl., 2 fig.
- Chapon G. (1964) : Etude hydrogéologique du bassin de Fès-Meknès. *Rapp. Inéd. arch. MTPC/DH/DRE*, 70 pp. 22 fig.
- Chaponnière A. (2005). Fonctionnement hydrogéologique d'un bassin versant montagneux semi-aride, cas du bassin versant du Rehraya (haute atlas marocain). Thèse,

institut national agronomique paris-grignon. Centre d'études spatiales de la biosphère. 268p.

- Charrière A. 1990. Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intracontinentale : Le Moyen Atlas au SE de Fès (Maroc). Thèse Doctorat Sci., Univ. Toulouse, France, 589 p.
- Chebbi A. Bargaoui Z. Abid Z. Cunha M. (2017). optimization of a hydrometric network extension using specific flow, kriging and simulated annealing. journal of hydrology. pp 971–982
- Cherai B., Charroud M., Lahrach A., EL Moutaouakil N. (2004). Le front sud rifain une expression complexe d'une tectonique tangentielle à la limite du bassin de Sais au Mio-Pliocène et au Quaternaire (Région de Fès, Maroc). Colloque international à la mémoire de Feue A. Faure Muret, Rabat, Maroc, 13. 11.
- Cherai B., Charroud M., Lahrach A., El Moutaouakil N. (2005). Risques naturels et problèmes d'aménagements urbains dans la ville de Fès, Maroc. 3ème Journée internationale des Géosciences de l'environnement, El Jadida, Maroc, 52.
- Chow VT., Maidment DR., Mays Lw. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill: New York. 572 p.
- Cirak P., 1985. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur, évolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours des phases de comblement. Thèse Doct. Etat. Univ. Bordeaux I, N°837, 285 p.
- Cirak P., 1987. Le bassin sud-rifain occidental au Néogène supérieur, évolution de la dynamique sédimentaire et de la paléogéographie au cours des phases de comblement. Mém. Inst. Géol., Bassin d'Aquitaine, Bordeaux, N° 21, 187 p.
- Claudie B., Taha B.M.J.O. et Ousmane S. (2007). Étude comparative de méthodes d'homogénéisation des précipitations (Rapport de recherche, n° R-907). Chaire en hydrologie statistique Hydro-Québec/CRSNG et Chaire du Canada en estimation des variables hydrologiques, janvier 2007.
- Colo G. (1961). Contribution à l'étude du Jurassique du Moyen-Atlas septentrional. Notes et M. Serv. géol. Maroc, n° 139.226 pp.
- Combe M. (1975) Le couloir Fès-Taza. In : Ressources en Eau du Maroc, tome 2. Edition du SGM
- Cosandey C., Robinson M. (2000). Hydrologie continentale Edition Armand colin, paris, 360 p.
- Cosandey Cl. (2003). Les eaux courantes ; géographie et environnement. Edition belin, paris ; 240 p.
- Cottet M., Rivière-Honegger A., Piegay H. (2010). Mieux comprendre la perception des paysages de bras morts en vue d'une restauration écologique : quels sont les liens entre les qualités esthétique et écologique perçues par les acteurs. Norois, n° 216, p. 85-103
- Coulon C. (2015). Etude de la sensibilité de la densité de drainage aux hypothèses de calcul. Université Pierre et Marie Curie.

- Daguin F., (1927). Contribution à l'étude géologique de la région pré-rifaine (Maroc occidental). Notes et mémoires Service géologique, Maroc 1, 410~.
- Daniel J., et AL. (2009). Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France. L'espace géographique, vol. 38. /2. 157-170
- Dearden P., (1985). Philosophy, theory and method in landscape evaluation, Canadian Geographic, vol. 29, p. 263-265
- Delannoy H. (1997). Remarque sur la climatologie de la façade atlantique ibéro-marocaine au sud de 40°N. in : le climat et les hommes. Rennes : presses universitaires de Rennes, pp 301-17.
- Derruau M. (2001). Les formes du relief terrestre : notions de géomorphologie. Edition, Armand Colin. Paris, 119p.
- Despax A., Perret C., Garçon R., Hauet A., Belleville A., Le Coz J., Favre A. (2017). Prise en compte de la qualité de l'échantillonnage dans l'estimation de l'incertitude des jaugeages par exploration du champ des vitesses (Méthode Flaure). Congrès SHF. Despax et al. – Incertitude des jaugeages au courantomètre. Pages 9.
- Despax A., Dramais G., and Hauet A. (2014). Rapport d'essai : Comparaison de mesures du débit des petits cours d'eau par courantomètres sur perche. Journées d'intercomparaison des 15, 16 et 17 octobre 2013 [Comparaison of flow measurements with current meters on wading rods. Intercomparison Days 15, 16 and 17 October 2013. (In French)]. Groupe Doppler Hydrométrie, technical report, 54 p.
- Despax A., Perret C., Garçon R., Hauet A., Belleville A., Le Coz J., & Favre A. C. (2016). Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. Journal of Hydrology, 533, 128-140.
- Despax, A., Belleville, A. & Favre, A.-C. (2015). Adaptive method for quantifying uncertainty in discharge measurements using velocity-area method. Geophysical Research Abstracts. Vol. 17, EGU2015.
- Deubriel P. (1974). Initialisations à l'analyse hydrologique Ed, Masson, Paris. 215 p
- Devos A., 2003, les limites spatiales en hydrologie, exemple de discrétisation spatiale en période d'étiage, travaux de l'institut de géographe de Rennes n° 113 -114.
- Devos A., Nejari A., Gille E., Akdim B., Benjelloul M. (1999), ressources et usages de l'eau dans le bassin supérieur de l'oued Guigou (moyen atlas), étude de géographie physique, travaux 199-n°xxvii, Cagap ? Aix-en-Provence.
- Döll P. (2002). Impact of climate change and variability on irrigation requirement : a global perspective, climatic change, 54, pp. 269-293,
- Dooge J. C. I. (1988). Hydrology past and present. Journal of Hydraulic Research, 26(1), 5-26.
- Douguedroit A. (1997). Climat du bassin méditerranéen. In : le climat et les hommes. Rennes : presses universitaires de Rennes, pp 251-80.
- Dresch J. (1941). Recherches sur l'évolution du relief dans le massif central du grand-atlas Le Haouz et le Sous Arrault et Cie maître Imprimeur. Tours

- Dresnay R. (1963). Données stratigraphiques complémentaires sur le jurassique du moyen atlas septentrional. Notes et Mem Serv. Géol. Maroc ; n 139 et 139 bis ; 226 p.
- DRHS. (1989). Exploration des eaux profondes, approche des infiltrations dans le causse Moyen Atlasique, application d'un modèle global a réservoirs. Rapport technique. Projet mor 86/004. 75P.
- El Arabi H. (2001). La plate – forme carbonatée jurassique (Hettangien ?- Aalénien) du Moyen Atlas occidental (Maroc), zone de transition entre le sillon moyen atlasique et le bassin occidental du Selloum. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Fès, 294p.
- El Ghachi M., Corbonnois J. (2000). Évolution du lit de la Seille sous l'influence des actions anthropiques (Lorraine, bassin de la Moselle). Hiérarchisation des processus de la dynamique fluviale par le traitement statistique des données (poster commenté). Revue MOSELLA., Tome XXIX n° 3-4. Spatialisation et cartographie en hydrologie. Université Paul Verlaine, Metz. PP 353-362.
- El Jihad M.D. (2003). Les sécheresses saisonnières dans le haut bassin de Oum-Erbia (Maroc central). Sècheresses ISSN 1147-7806, 2003, Vol.14, no3, 157-167.
- El Ouazani A, Sahbi H, Essahlaoui A., Tabyaoui F.Z. (2003). Apport de l'étude des débits de sources à la reconnaissance hydrogéologique, cas des sources Ribaa-Bittit dans le plateau de Meknès (Maroc). Revue Géomaghreb, Fès.
- Escourou G. (1978). Climatologie pratique. Edition Masson, collection géographie, 172 p.
- Essahlaoui A. (2000). Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès-Fès (Maroc). Prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse Doct. En Sc. App. Ecole Mohammadia d (ingénieurs, Rabat, Maroc, 258p.
- Essahlaoui A., Et El Ouali A. (2003). Détermination de la structure géologique de la partie sud de la plaine du Saïs (bassin de Fès-Meknès, Maroc) par la méthode géoelectrique. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Volume 62, N 2, 155-166.
- Estives M. (1981). Mesure de débits par intégration des cours d'eau –normalisation des méthodes de traitement des données. Rapport HYDREST- agence de l'eau Rhin Meuse, P15 FRECAUT René et PAGNEY Pierre ; 1983 « Dynamique des climats et l'écoulement fluvial » Edition MASSON ; Paris ; 239 P
- Fassi D. (1999). Les formations superficielles du Saïs de Fès et de Meknès. Edition du service géologique, Rabat, 401 p.
- Fedan B. (1988). Evolution géodynamique d'un bassin intraplaque sur décrochements : le Moyen Atlas (Maroc) durant le MésoCénozoïque. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 337 p
- Fellahi M., Margat. J. (1959). Un sondage artésien contribuera à l'alimentation en eau de la ville de Fès. Mines et Géol, Rabat N°5, pp 57-58.
- Ford DC., Williams PW. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. Chichester, UK, Wiley, 10p.

- François D, Sary M, Zumstein J.F, ET AUER J.C, (1994), étude méthodologique des Débits d'étiages, rapport C.E.G.U.M. LABHAR M. ET AKDIM B, (2000), Groupements végétaux et dynamique du milieu dans la cuvette de Skoura et ses bordures occidentales (Moyen Atlas) Mossella -tome XXV n° 3-4, PP 227-239.
- Gagkas Z., Lilly A. (2019). Downscaling soil hydrological mapping used to predict catchment hydrological response with random forests. *Geoderma*. PP216–235
- Garratt J. R. (1993). Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary - layer treatments - A review, *J. Climate*, 6, 3, 419-448.
- Garratt J.R. (1984). The measurement of evaporation by meteorological methods». *Agricultural Water Management*, Volume 8, p. 99-117.
- Gentil L. (1912). *Le Maroc physique*. Alcan édit., Paris, Coll. sc., 320 p.
- Gentil L. (1917). *L'Histoire physique du Maroc*. Conférences de l'Exposition franco-marocaine à Casablanca (1915). Imprimerie armoricaine, Nantes, 27 p
- Giordano R., Passarella G., Uricchio V. F., Vurro M., (2005). Fuzzy cognitive maps for issue identification in a water resources conflict resolution system, *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 30, p. 463-469.
- Giret A. (2007). *Hydrologie fluviale*. Edition, Ellipses. Paris, 226.
- Gobster P. H., Barro S. C., (2000). Negotiating nature. Making restoration happen in an urban park context, dans Gobster P. H., Hull R. B. (dir.), *Restoring nature. Perspectives from the social sciences and humanities*, Washington D.C., Island press, p. 185-207.
- Gobster P. H., Nassauer J. I., Daniel T. C., Fry G., (2007). The shared landscape: what does aesthetics have to do with ecology?, *Landscape Ecology*, vol. 22, p. 959-972.
- Gravelius H. (1914). *Grundriss der gesamten gewässerkunde*, Bande I: *Flubkunde (Compendium of Hydrology)*, vol 1: Rivers, in German). Goschen, Berlin, Germany
- Guilcher A. (1965). *Précis d'hydrologie : marine et continentale*, Edition MASSON, Paris ; 389 P.
- Hakim B. (1982). *Recherches hydrologiques et Hydrochimiques sur quelques karsts méditerranéens : Liban, Syrie et Maroc*. Thèse de doctorat d'état. Univ d'Aix Marseille II.
- Hernandez M., Miller S.N., Goodrich D.C., Goff B.F., Kepner W.G., Edmonds C.M., Jones K.B. (2000). Modelling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, 285-298.
- Herschy R. W. (1975). The accuracy of existing and new methods of river gauging. These de doctorat, University of Reading. 485 p
- Herschy R. W. (1993). The velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, 4(1):7–10
- Herschy R.W. (2002). The uncertainty in a current meter measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13 :281–284.
- Herzog T. R. (1985). A cognitive analysis of preference for waterscapes, *Journal of Environmental Psychology*, vol. 5, p. 225-241.

- Herzog T. R., Bosley P. J. (1992). Tranquility and preference as effective qualities of natural environments, *Journal of Environmental Psychology*, vol. 12, p. 115-127.
- Hiez G. (1977). L'homogénéité des données pluviométrique. Orstome, université de Fortaleza (Brésil). *Hydrologie*, 2. 1988. 245-261
- HINAJE S. (2004). Tectonique cassante et paléochamps de contraintes dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas central (Midelt-Errachidia) depuis le Trias jusqu'à l'actuel. Thèse Doc. Etat, Univ. Rabat, 363p.
- Hmamssi I. (2007). Oued Sebou : un bassin hydraulique en péril. *Journal Aujourd'hui le Maroc*. Numéro de parution 1393.
- Horton R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle, *Trans. American Geophys. Union*, vol. 14, pp. 446-460.
- Horton R. E. (1940). An approach towards a physical interpretation of infiltration capacity, *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, vol. 5, pp. 399-417.
- Hubert P. (1997). Change points in hydrometeorological time series. In: *Proc. Conf. Applications of Time Series Analysis in Astronomy and Meteorology*, 399-412.
- Hubert P., Carbonnel J. P. (1993). Segmentation des séries annuelles de débits de grands fleuves Africains. *Bull. du CIEH, Ouagadougou* 92,3-10. 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. *J. Hydrol* 10, 349-367
- Ibery B. W., Foster I. D. L., Donogue P. J., (1982). Perception and water quality: a geographical perspective, *Progress in Physical Geography*, vol. 6, n° 4, p. 524-540.
- Imbeaux E. (1930). *Essai d'hydrogéologie*, Dunod, Paris, 704 P.
- IRD-Orstom. 1998. *Khronostat Version 1.0*. Logiciel, Orstom, Montpellier.
- Itier B. et C.H. Riou. (1982). Une nouvelle méthode de détermination de l'évapotranspiration réelle par thermographie infrarouge ». *Journal de recherches atmosphériques*, Volume 16, p. 113-125.
- Jnan L. (2004). Le Moyen Atlas central et ses bordures –mutation récentes et dynamiques rurales, Ed Al jawahir ; 705P
- Joncas R., J. Champagne Et G. Jacques. (1993). Accumulation d'eau dans les installations d'Entreposage des fumiers à ciel ouvert pour différentes municipalités au Québec en fonction de périodes de retour. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec, Canada.
- Koukkal B., Dominik J., Vignati D., Arpagaus P., Santiago S., Ouddane B., Benaabidate, L. (2004). Assessment of water quality and toxicity of polluted rivers Fez and Sebou in the region of Fez (Morocco). *Environ Pollut.* 131, 163-172
- Labata D., Ababoub R., Mangin A. (2002). Analyse multirésolution croisée de pluies et débits de sources karstiques. *Géosciences de surface*. Pp 551-556.
- Labhar M. (1998). Les milieux forestiers et péri-forestiers du Moyen Atlas central nord-occidental : Approche géographique, phytoécologique et dynamique. Thèse de doctorat d'état en géographie. Université libre de Bruxelles, 469p.

- Laborde J. P. (2000) : Cours d'hydrologie, Université de Nice, 204 pages
- Laborde J.-P., Mouhous N., (1998). Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Équipe de gestion et Valorisation de l'Environnement, Nice, 4 p.
- Lamarre D., & Pagney P. (1999). Climats et sociétés. Paris : Armin colin, 1999 ; 292 P.
- LAMAS L. (1993). Hydrologie générale. Principes et applications. 2 ème édition. Ed Gaëtan Morin, 527 p.
- Lambert R. (1996) Géographie du cycle de l'eau. Presses Univ. Du Mirail, Toulouse, 439 p.
- Lamhamdi D., Chbouki N. (1994). Les principaux facteurs influençant la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Manetti). Ann. Rech. For. Maroc, T (27), 243-257 pp.
- Lang C. (2007). Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? : L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse de Doctorat, Université de Metz, CEGUM, 292 p.
- Lang C., Freyermuth A., Gille E., François D. (2006). Le dispositif pressage (prévisions et Simulations pour l'Annonce et la Gestion des Etiages Sévères) : des outils pour évaluer et prévoir les étiages. Géocarrefou, Vol 81/1, pp. 15,24.
- Lang C., Gille E. (2006). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage », Norois [En ligne], 201, 15 p.
- Laraichi S., Hammani A., Kuper M., Bouignane A. (2016). Intégration des données spatio-temporelles dans la gestion de la nappe de Saïss ?
- Larocque M., Mangin A., Razack M., Banton O. (1998). Contribution of correlation and spectral analyses to regional study of a large karst aquifer (Charentes, France). J Hydrol 205: 217–231
- Larras J. (1972). Prévision et prédétermination des étiages et des crues. Ed Eyrolles, 160 pages
- 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, Fès, Maroc. 265 pages.
- Latati A. (1985). Thoughts on karst water resources in the Middle Atlas Mountains, Morocco. In: Günay G, Johnson AI (eds) Karst water resources, proceedings of a symposium held at Antalya/Ankara, July 1985. IASH Publ. 161, IAHS, London, pp 633–64
- Le Coz J., Marie Bechon P., Camenen B., Dramais G. (2014,). La Houille Blanche, n° 5, PP31-39.
- Le Coz J., Renard B., Bonnifait L., Branger F., Le Boursicaud R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. Journal of Hydrology. PP. 573–587
- Le Coz, J. Bechom, P.M. Camenen, B. Dramais, G. (2014). Quantification des incertitudes sur les jaugeages par exploration du champ des vitesses. La Houille Blanche, n° 5, PP31-39.

- Le Floc'h E., Aronson J. (1995). Écologie de la restauration. Définition de quelques concepts de base, Natures-Sciences-Sociétés, vol. vol 3, n°numéro spécial, p. 29-35.
- Lebaut S. (2001). L'apport de l'analyse et de la modélisation hydrologiques de bassins versants dans la connaissance du fonctionnement d'un aquifère : les Grès d'Ardenne-Luxembourg. Thèse de doctorat, Mosella, tome XXVI, n°1-2, 212 p.
- Lebel t., Diedhiou A., & Laurent H. (2003). «Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at the hydrological scales». 1. Geophys. Res. 108
- Lebel T., Laborde J.P. (1988). A Geostatistical approach for areal rainfall statistics assessment. Stochastic
- Leduc C., Pulido-Bosch A., Remini B. (2017). Anthropization of groundwater resources in the Mediterranean region: processes and challenges. Hydrogeol J 25:1529–1547
- Lee K., Che Ho, H., Marian M., Hung Wu C. (2014). Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro ADCP. Journal of Hydrology 509. PP101–114
- Lejeune O, Devos A., Marre A. (2000). Spatialisation des débits d'étiage de la Blaise (Marne-France) EA 3795 G.E.G.E.N.A. (Groupe d'étude sur les Géomatériaux et les Environnements Naturels et Anthropiques), UFR Lettres et Sciences Humaines, 57 rue Pierre Taittinger, 51096 Reims Cedex,
- Lettenmayer D.P. (1976). Detection of Trends in Water Quality Data from Records with Dependant Observations. Water Resources Research, 12 (5), pp. 1037-1046.
- Linsley R., Kohler M., Paulhus L. (1975). Hydrology for Engineers., New York, Collection Mc Graw Hill, 492 p.
- Lombard-Latune, R., Chahinian, N., Perrin, J. L., Benaabidate, L., & Lahrach, A. (2010). Hydrological processes controlling flow generation in a Mediterranean urbanized catchment. IAHS-AISH Publication, 340(October), 69–76.
- Loup J. (1974). Les eaux terrestres. Hydrologie continentale. Masson
- Lubès-Niel H., Masson J.M., Paturel J.E., Servat E. (1998). Climate variability and statistics. Simulating the power and robustness of some tests used to check the homogeneity of chronic. Journal of Water Sciences, 11(3), 383-408
- Mac Donald et Partners. (1990). Etablissement et mise au point du modèle de gestion des nappes du bassin de Fès-Meknès. Département de coopération technique pour le développement. Nations Unis. Rapport DRPE (inédit)
- Malardel, S. (2005). Fondamentaux météorologie – A l'école du temps. Cépaduès. 710p.
- Mangin A. (1984). Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales, J. Hy- drol. 67 25–43
- Margat J. & Taltasse P. (1952). Hydrogéologie du Maroc : Bassin lacustre de Fès-Meknès. Notes et Mém. Serv. Géol., Maroc, n° 97: 128-141.
- Margat J. (1960). Hydrogeological map of the Fes-Meknes basin at 1 / 100,000. Rabat: Edition of the Office of Irrigation.
- Margat J. (1997). Evapotranspiration ; C.N.F.S.H. (www.cig.ensmpba.fr)
- Marsily G. (1981). Hydrogéologie quantitative. Masson.

- Martin J. (1981). Le milieu Atlas central ; étude géomorphologique. Édition service géologique du Maroc.
- Martonne, E. de. (1941). Hypsométrie et morphologie. Détermination et interprétation des altitudes moyennes de la France et de ses grandes régions naturelles. *Annales de Géographie*, 50(284), 241–254. <https://doi.org/10.3406/geo.1941.19201>
- Meylon P., Avre A-C., Musy A. (2008). *Hydrologie fréquentielle une science prédictive*. Presses polytechniques et universitaires romandes. 173 P.
- Michel A. (1995). *Hydrométrie appliquée aux cours d'eau*. Edition Eyrolles. Montpellier II, Ecole des Mines de Paris.
- Mishra, A.K. Coulibaly, P. (2010). Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, 380 PP420–437
- Moser G. (1984). Water quality perception, a dynamic evaluation, *Journal of Environmental Psychology*, vol. 4, p. 201-210
- Mounier J. (1977). Les climats océaniques des régions atlantiques de l'Espagne et du Portugal. Thèse de doctorat d'Etat, université de Rennes 2, 1977 (Reproduction université Lille 3, 1979), 3 tomes, 1221 P+246p.
- Mouratiadou I., Moran D. (2007). Mapping public participation in the Water Framework Directive: a case study of the Pinios River Basin, Greece, *Ecological Economics*, vol. 62, p. 66-76.
- Musy A., Higy C., Reynard E. (2014). *Hydrologie 1, Une science de la nature, une gestion sociétale*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2^e édition revue et argumentée, 489 pages.
- Nassauer J. I. (1992). The appearance of ecological systems as a matter of policy, *Landscape Ecology*, vol. 6, n° 4, p. 239-250.
- Nassauer J. I. (2004). Monitoring the success of metropolitan wetland restorations: cultural sustainability and ecological function, *Wetlands*, vol. 24, p. 756-765.
- Nassauer J. I., Kosek S. E., Corry R. C. (2001). Meeting public expectations with ecological innovation in riparian landscapes, *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 37, n° 6, p. 1439-1443.
- Nejari A. (2002). La sécheresse, l'Eau, et l'Homme dans le Bassin Versant du Haut Sebou (Moyen Atlas Septentrional – Maroc) - CEGUM.
- Normand M. (1984). *Hydrologie des sources du bassin de Meknès-Fès (situation au 1^{er} Trimestre 1984) : Note de synthèse*. Rapport DRHS. (Inédit)
- 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. 422 pages.
- Obda Kh., Gille E., Akdim B. (2000). Application de la méthodologie des profils hydrologiques dans la gestion des ressources en eau : cas des oueds Zloul (Moyen Atlas Septentrional) et Nekor (Rif Central)". In Mosella. Xxv, n°3-4. PP.109-120.
- Obda Kh., Taous A., Amyay M., Lasri M. (2017). *Hydrologie du Saïss-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. Nejari, A, Devos, A. (2000). Spatialisations des débits d'étiages du Haut Sebou (Moyen Atlas) aspects méthodologiques et ressources en eau", Mossella -tome XXV n° 3-4, PP.121-138.
- Ouarda T-B., Rasmussen P-F., Bobée B. et J. Bernier. (1998). Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle. Revue des Sciences de l'Eau 11 (n° spécial) : 41-49.
- Ouranos. (2010). Savoir s'adapter aux changements climatiques, Montréal,
- P. Caron J.Y., Jamin A., Richard T. (2006). Coordinations hydrauliques et justices sociales. Actes du séminaire, novembre 2004, Montpellier, France. Cirad, Montpellier France, Colloques
- Pansu M. et Gautheyrou J. (2003). L'analyse du sol minéralogique, organique et minérale. Bonchamp-lès-Laval : Springer, pp. 993.
- Paturel J.E., Servat E., Kouame B., Boyer J.F., Lubes Niel H., Masson J.M. (1995). Identification Procedures "breaks" in time series - changing rainfall patterns in Africa not Sahelian West. IAHS Publ. no. 238, 99-110.
- PDAIRE. (2011). Étude d'actualisation du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin hydraulique de Sebou, Agence de Bassin Hydraulique de Sebou, note de synthèse, 103 p.
- Perret C. (1992). Les moulinets. Etalonnages - Comportement - Entretien. Rapport technique. 59 p.
- Perret C. (2014). Métier surveillance et prévision hydrométéorologique - analyse de l'activité production de données - vision moyen terme. Rapport interne, EDF. 23 p
- Perrin J. L., Raïs N., Chahinian N., Moulin P., & Ijjaali M. (2014). Water quality assessment of highly polluted rivers in a semi-arid Mediterranean zone Oued Fez and Sebou River (Morocco). Journal of Hydrology, 510, 26–34
- Pilgrim D.H., Chapman, T.G., Et Doran, D.G. (1988). Problems of rainfall-runoff modeling in arid and semi-arid regions. Hydrological sciences Journal, 33 : 379-400.
- 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, Maroc. 355 pages.
- Qadem A., Qadem Z., Obda Kh. (2019). Les Aspects Hydro-Climatiques de la Sècheresse dans la Plaine de Saïs Fès et ses Bordures (Maroc) : de l'Abondance à l'Indigence des Ressources en Eau ». Sécheresses. PP XX-XX
- Qadem Z., Obda Kh., Lasri M., Qadem A. (2017). Spatialisation Des Débits d'Etiage des Bassins Versants des Oueds Fès et Mikkès, Saïs Fès et sa Bordure Moyenne Atlasique : Aspects, Méthodologiques et Ressources en Eau, Maroc. L'Eau Ressources Risques & Aménagement, LAGEA-DD USMBA-FLSH-Saïs, PP 95- 106

- Qadem Z., Obda Kh., Qadem A., Lasri M. (2018). Quantification of surface water resources: from hydrometric measurement to spatialization by GIS. The catchments of Oueds Fez and Mikkès as cases of study. Morocco. Journal of Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence. Volume 2 Issue 4, PP 52-60.
- Qadem Z., Obda Kh., Qadem A., Lasri M. (2019). Contribution of the GIS in Terms of Knowledge of the Situation of the Water Resources of the Plain of Saïs Fez and its Middle Atlasic Borders—Morocco: Aspects, Methods and Quantification of Water Resources». Advances in Science, Technology & Innovation, Springer. PP 83-94. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-24974-8_6
- Qadem Z., Qadem A., Obda Kh., Lasri M. (2018). Variabilité Climatique et Ressources en Eau dans le Bassin Versant de l'Oued Maasser. Climat, Eau et Société, Volume I. PP 96-113.
- Qadem Z., Qadem A., Obda Kh., Lasri M. (2018). Variation spatiotemporelle des écoulements de l'oued Maasser. (Maroc). Climat, Eau et Société, 2015. Beni Mellal. Numéro 1- Septembre. PP 97-113.
- Qadem Z., Qadem A., Obda Kh., Lasri M. (2019). Production des Données Hydrométriques par Exploration du Champ des Vitesses (Jaugeage) : Méthodes et Applications. Cas des Bassins ». Climat, eau et société, Volume II. Pp XX-XX.
- Qadem Z., Qadem A., Obda Kh., Lasri M. (2019). Variabilité Climatique et son Impact sur l'Organisation Spatiotemporelle des Précipitations. Cas des Bassins Versants des Oueds Mikkes et Fès. Maroc ». Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence. Volume 3 Issue 2. Page XX-XX.
- Ramade F. (1993). Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement, Ediscience internationale, 822.P
- Rantz S. E. (1971). Suggested criteria for hydrologic design of storm-drainage facilities in the San Francisco Bay region, California. Open file report, U.S. Geological Survey, Menlo Park, CA.
- Rantzs E. (1982). Measurement and computation of streamflow. Vol. 1, Measurement of stage and discharge. Water-Supply. Washington: US Geological Survey. Paper 2175
- Real E., Arce C., Sabucedo J. M. (2000). Classification of landscapes using quantitative and categorical data, and prediction of their scenic beauty in North-Western Spain, Journal of Environmental Psychology, vol. 20, p. 355-373.
- Rhoda F., Jean-Paul B., Marcel K., et Olivier P. (2018). Analyse du basculement des modes d'extraction des eaux souterraines dans le Saïss (Maroc) Vers une reconfiguration des mondes des eaux cachées ? Développement durable et territoires, Vol. 9, n°2. 27P
- Roche M. (1963). Hydrologie de surface. Gauthier-Villars ORSTOM, Paris, 429 p
- Roche M. (1969). Les processus du raisonnement chez l'hydrologue, Bulletin de la Section Géographique, 11 p.
- Roche P. A., Pierre-A., Miquel J., & Gaume E. (2012). Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision. 245P
- Rognon P. (1997). Sécheresse et Aridité : Leur impact sur la désertification au Maghreb. Sécheresse, 7 : 287-297.

- Roy J. M. Tutorial ArcGIS. Université de Sherbrooke.
- Russo, P., Russo, L., 1934. Le grand accident sud-atlasien. Bulletin de la société géologique de France, 5ème série (T. IV): 378-384.
- Sabaoui, A. (1998) : Rôles des inversions dans l'évolution méso-cénozoïque du Moyen Atlas septentrional (Maroc). L'exemple de la transversale El Menzel – Riabt Al Khayr – Bou Iblane. – Thèse d'Etat, Rabat, 432 p.
- Sabatier J-L., RUF T. (1995). La gestion sociale de l'eau. ORSTOP.
- Sary M., B. Akdim. (2000). La sécheresse hydrologique récente dans le bassin du Haut Sebou. Mossella-tome XXV n°3-4, PP 71-82.
- Schoeler H. (1962). Les Eaux Souterraines. Hydrologie dynamique et chimique, Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources. 187 fig. Paris : Masson et Cie, 642p
- Schoeller H., (1935). Utilité de la notion des échanges de bases pour la comparaison des eaux souterraines vadoses n, Bull. soc. geol. Fr. (5). t. 5. 1935, p. 651-657.
- Sirtou M. (1995). Etude Hydro-Climatologie Des Bassins Du N'fis, Du Rehraya, De L'Ourika Et Du Zat (Maroc). Thèse de doctorat, Université de Metz. 311P
- Smith D. G., Davies-Colley R. J., (1992). Offsite measurement of the visual clarity of waters, Water Resources Bulletin, vol. 28, p. 951-957.
- Sophocleous M. (2002). Interactions between groundwater and surface water : the state of the science. Hydrogeology Journal, 10(1) : 52-67.
- Sophocleous M., et Perkins S. P. (2000). Methodology and application of combined watershed and ground-water models in Kansas. Journal of Hydrology, 236, 185-201.
- Sophocleous M. (2000). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. Springer-Verlag, Hydrogeology Journal, 10 :52-67
- Souad R., Mania J., Bouchaou H. (2004). Analyse hydrologique et caractéristiques physiques de quelques bassins versants en zone semi-aride (Maroc). Géomaghreb, n° 2, pp83- 89.
- Stahl K., Hisdal H., Hannaford J., Tallaksen L. M., Van Lanen H.A.J., Sauquet E., Demeuth S., Fendekova M., et Jodar J. (2010). Streamflow trend in Europe: evidence from dataset of near-natural catchments, hydrol. Earth Sys. Sci., 14, pp 2367-2382,
- Steinwender A., Gundacker C., Wittmann K. J., (2008). Objective versus subjective assessments of environmental quality of standing and running waters in a large city, Landscape and urban planning, vol. 84, p. 116-126.
- Strahler A. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology,"Transactions American Geophysical Union, vol.38, Pp.913-920,
- Strahler A. (1964). Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. InHandbook of Applied Hydrology,V. T. Chow, Ed., section 4–11, McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Taltasse P. (1953). Recherches géologiques et hydrogéologiques dans le bassin lacustre de Fès-Mèknes. Edition Félix Mancho, Rabat, 300 p.

- Taous A. (2005). Géométrologie fluviale ; processus morpho sédimentaires, ajustements spatio-temporels, paléo environnements et mutations des espaces fluviaux. Publication de la 'FLSH' Saïss Fès, série : thèses et monographies, n° 11, 425p.
- Tarboton D. G., Bras R. L., et Rodriguez-Iturbe I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes*,
- Tennevin M. (1978). Paysages Karstiques du Moyen Atlas Septentrional. In : Méditerranée, Deuxième série, Tome 32, pp. 23-32.
- TERMIER H. (1936). Études géologiques sur le Maroc central Et le Moyen Atlas septentrional : Not. Mém. Serv. Mine. Et Carte géol. Maroc. N° 33.
- Ulrich R. S. (1981). Natural versus urban scenes. Some psychophysiological effects, *Environment and Behavior*, vol. 13, p. 523-556
- Vieux Boukhaly T., Mamadou N., Cheikh M., Giovani M., Joseph S., Aboubaker C-B., Amadou T-D. (2017). Khronostat Model as Statistical Analysis Tools in Low Casamance River Basin, Senegal. *World Environment*, 10-22pp.
- Vigneau Jp. (2000). Géoclimatologie. Paris : Ellipses, 2000 ; 334p.
- Warin F. (1994). Etude statistique de la série pluviométrique de Padova (Italie). DEA National d'Hydrologie Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives. Université Pierre et Marie Curie, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 36pp.
- Wernli R. (1988). Micropaléontologie du Néogène post-nappes du Maroc septentrional et description systématique des foraminifères planctoniques. Notes et Mémoires du Service Géologique, Maroc, 331, 266 p.
- WMO (1994). Guide to Hydrological Practices, 5th Edition World Meteorological Organization No. 168, Geneva.
- WMO (2007). Exploratory Meeting on CHy's Proposal for the Assessment of the Performance of Flow Measurement Instruments and Techniques. 04/25-27/2007, Meeting Final Report.
- Yamashita S. (2002). Perception and evaluation of water in landscape : use of photo-projective method to compare child and adult residents' perceptions of a Japanese river environment, *Landscape and Urban Planning*, vol. 62, p. 3-17.
- Yang B., Brown T. C. (1992). A cross-cultural comparison of preferences for landscape styles and landscape elements, *Environment and Behavior*, vol. 24, p. 471-507.
- Zeryouhi I. (1976). Le moyen atlas plissé. Ressources en eau du Maroc, note et mémoires du Ministre de l'énergie et des mines. Tome II, pp 67 :84
- Zumstein J-F. (1978). Contribution à l'élaboration de cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973," *La Houille Blanche*, n°6/7. P.13.
- Zumstein J-F. (1978). Contribution à l'élaboration de cartes hydrologiques. Cartes des étiages mensuels des bassins de la Meuse et de la Moselle de 1969 à 1973," *La Houille Blanche*, n°6/7. P.13.

ANNEXES

Annexe 1 : Comblement des lacunes par vecteurs régional**(*) Lacunes**

Station Fès (ABHS)						
Année	Mois	Vecteur	Cumul Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
2011	Juin	1,648	31,68	*	8,3	5,6
2012	Juin	0,432	32,11	*	2,2	6,0
2013	Juin	0,343	32,46	*	1,7	6,2
2011	Juillet	0,388	29,97	*	2,0	7,3
2012	Juillet	0,419	30,39	*	2,2	11,9
2013	Juillet	1,016	31,4	*	5,3	10,2
2013	Aout	1,453	33,82	*	33,5	29,2

Station Ifrane						
Année	Mois	Vecteur	Cumul Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
2010	Novembre	1,47	27,73	*	197,8	271,8

Dar Arsa						
Année	Mois	Vecteur	Cumul Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
2013	Juillet	1,016	31,4	*	0,3	0,9
2014	Juillet	0,765	32,17	*	0,2	0,8

Station Ain Louh						
Année	Mois	Vecteur	Cumul Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
2014	Avril	0,448	34,75	*	45,4	10,4
2010	Décembre	1,233	32,8	*	123,7	110,5
2013	Décembre	0,608	34,27	*	61,0	41,7
2014	Décembre	0,734	35	*	73,6	96,2
2015	Décembre	0	35	*	0,0	0
2014	Février	1,104	34,16	*	96,1	35,6
2015	Février	0,845	35	*	73,6	105,1
2014	Janvier	1,652	33,67	*	190,8	191,3
2015	Janvier	1,328	35	*	153,4	144,3
2011	Juin	1,648	31,68	*	47,6	62,5
2012	Juin	0,432	32,11	*	12,5	63,9
2013	Juin	0,343	32,46	*	9,9	32,0
2014	Juin	1,357	33,81	*	39,2	55,7
2015	Juin	1,186	35	*	34,2	5,8
2011	Juillet	0,388	29,97	*	5,5	0
2012	Juillet	0,419	30,39	*	5,9	0
2013	Juillet	1,016	31,4	*	14,3	0
2014	Juillet	0,765	32,17	*	10,8	0
2015	Juillet	2,832	35	*	39,9	32,0
2011	Mai	2,916	32,47	*	203,4	165,6

2012	Mai	0,185	32,65	*	12,9	16,0
2013	Mai	0,784	33,44	*	54,7	46,9
2014	Mai	0,122	33,56	*	8,5	54,9
2015	Mai	1,441	35	*	100,5	83,4
2014	Mars	0,504	33,81	*	46,1	105,2
2015	Mars	1,193	35	*	109,2	156,2
2010	Novembre	1,47	27,73	*	151,7	156,2
2013	Novembre	1,396	33,16	*	144,1	188,2
2014	Novembre	1,744	34,9	*	180	168,7
2015	Novembre	0,098	35	*	10,1	32,9
2010	Octobre	1,779	29,62	*	126,2	150,2
2013	Octobre	0,12	33,93	*	8,5	73,1
2014	Octobre	0,4	34,33	*	28,4	41,8
2015	Octobre	0,668	35	*	47,4	90,4
2010	Septembre	0,679	29,8	*	39,1	0
2013	Septembre	1,851	33,29	*	106,7	143,0
2014	Septembre	0,751	34,05	*	43,3	0
2015	Septembre	0,954	35	*	55	47,0

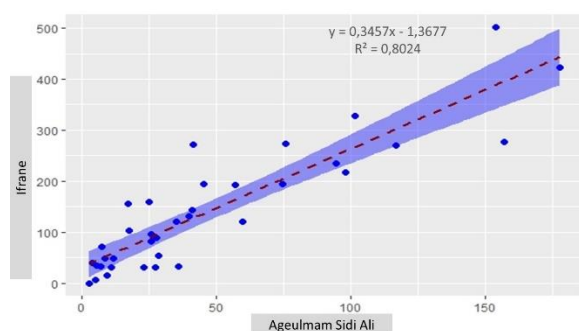
Station Imouzzzer Kenddar

Année	Mois	Vecteur	Cumul Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
2011	Aout	1,148	32,13	*	15,3	74,7
2014	Aout	0,078	33,9	*	1	24,8
2013	Juillet	1,016	31,4	*	15,3	65,4

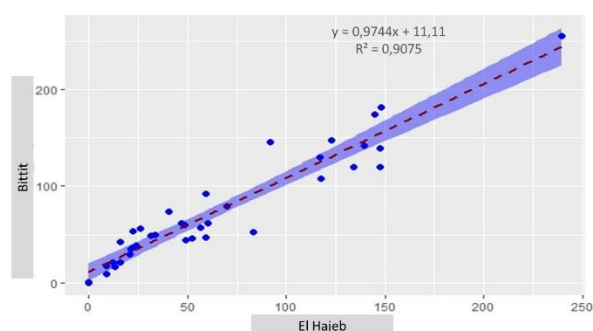
Station Ageulmam Sidi Ali

Année	Mois	Vecteur	Cumul Vecteur	Observé	Calculé	Calculé +/- Ecart
1992	Mars	1,627	12,46	*	36,3	29,7
2015	Aout	1,193	35	*	26,6	27,9
1992	Avril	1,303	14,18	*	25,8	19,0
1999	Avril	0,198	19,92	*	3,9	6,4
2009	Avril	0,23	29,67	*	4,6	0,5
2014	Avril	0,448	34,75	*	8,9	0
2015	Avril	0,248	35	*	4,9	4,4
2015	Février	0,845	35	*	16,6	18,9
1992	Janvier	0,035	9,61	*	0,6	0
1995	Janvier	0,188	11,01	*	3,0	0
2015	Janvier	1,328	35	*	21,0	9,6
1992	Juin	4,274	12,88	*	66,1	41,7
1994	Juin	0,168	13,95	*	2,6	1,7
2014	Juin	1,357	33,81	*	21,0	40,4
2002	Juillet	0,009	18,78	*	0,1	72,0
2009	Juillet	0,892	26,06	*	14,8	31,6
2014	Juillet	0,765	32,17	*	12,7	12,9
2009	Mai	0,579	29,01	*	14,2	9,2
2014	Mai	0,122	33,56	*	3,0	6,1

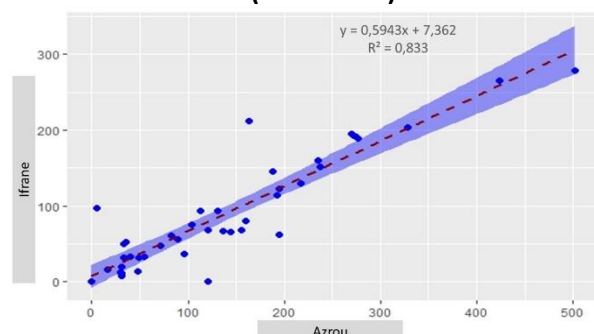
Annexe 2 : Double cumul des stations à combler



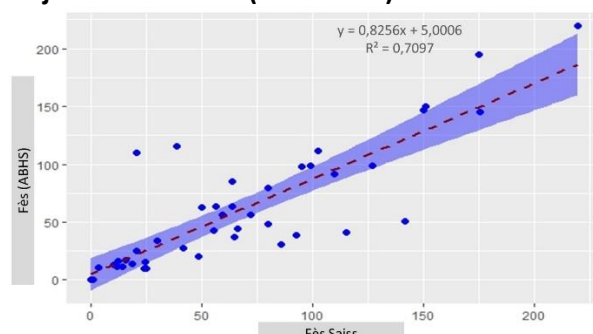
Corrélation entre les stations d'Agemgeum et Ifrane. Période de : (1980-2015)



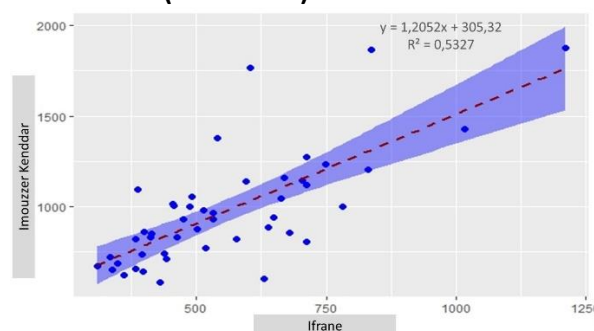
Corrélation entre les stations de Bittit et El Hajeb. Période de : (1978-2015)



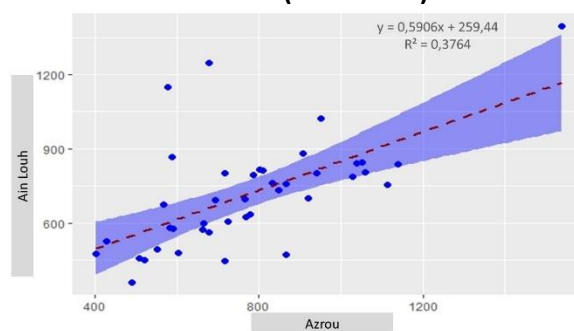
Corrélation entre les stations d'Ifrane et Azrou. Période de : (1973-2015)



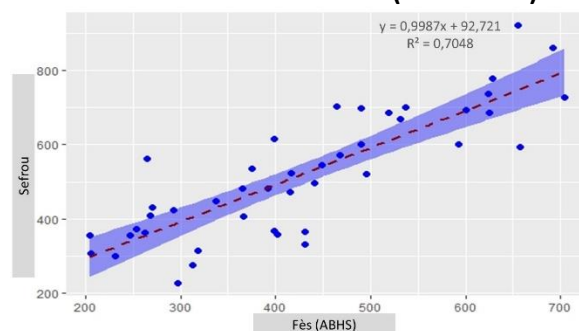
Corrélation entre les stations de Fès (ABHS) et Fès Saïss. Période de : (1972-2015)



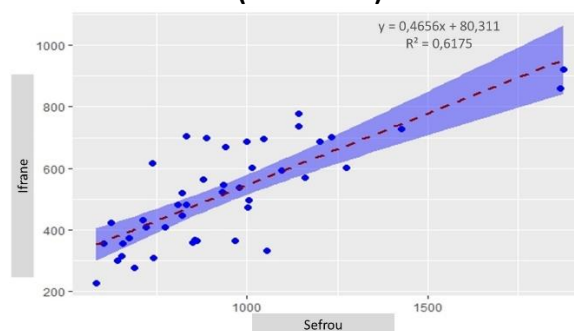
Corrélation entre les stations d'Imouzzet Kenddar et Ifrane. Période de : (1969-2015)



Corrélation entre les stations d'Azrou et Ain Louh. Période de : (1975-2015)

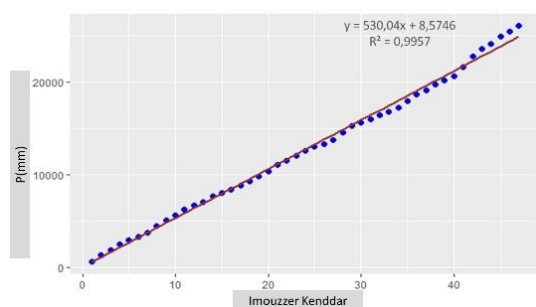


Corrélation entre les stations de Fès Sefrou et Fès (ABHS). Période de : (1972-2015)

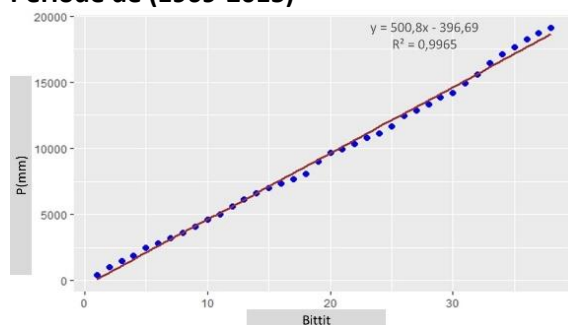


Corrélation entre les stations de Sefrou et Ifrane. Période de : (1972-2015)

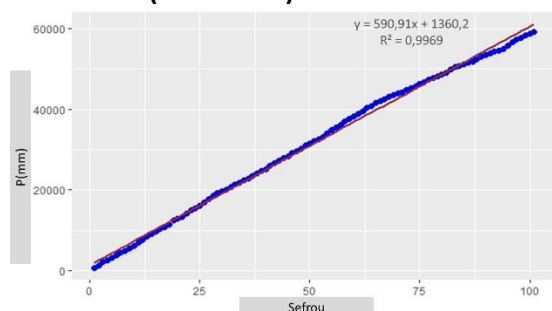
Annexe 3 : Simple cumul des stations à combler



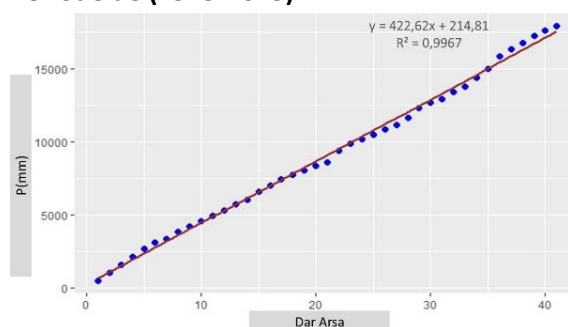
Simple cumul de la station d'Imouzzzer.
Période de (1969-2015)



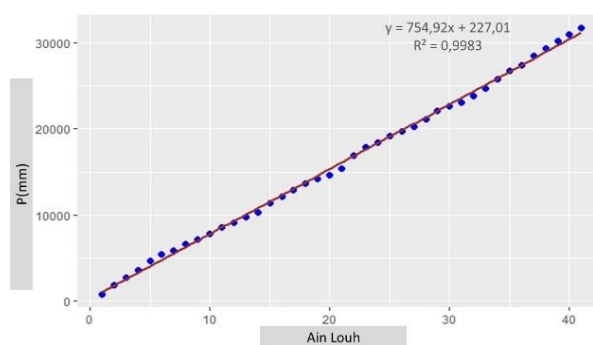
Simple cumul de la station Bittit.
Période de (1987-2015)



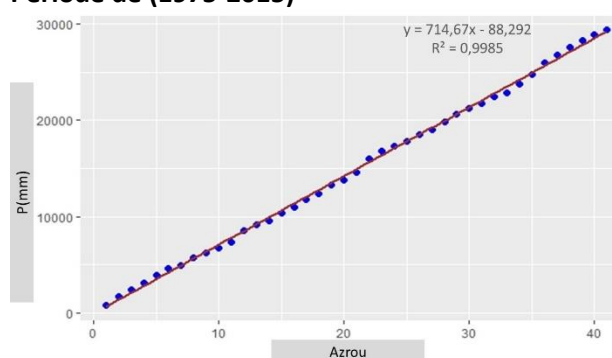
Simple cumul de la station Sefrou.
Période de (1915-2015)



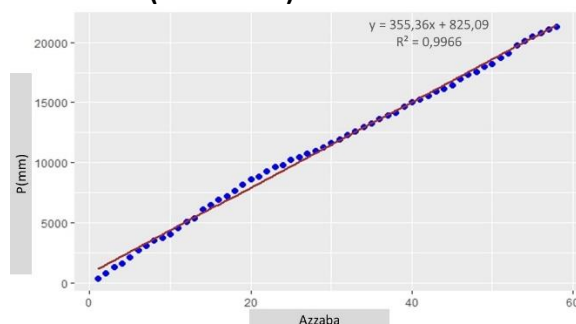
Simple cumul de la station Dar Arsa.
Période de (1975-2015)



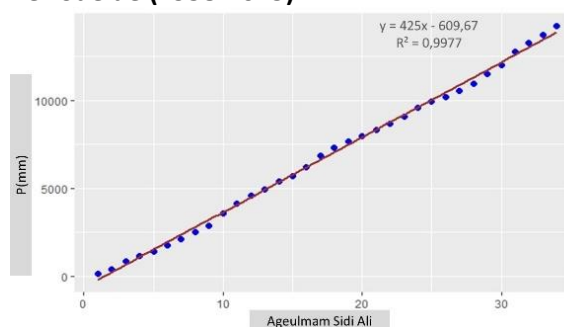
Simple cumul de la station Ain Louh.
Période de (1975-2015)



Simple cumul de la station Azrou.
Période de (1975-2015)



Simple cumul de la station Azzaba.
Période de (1958-2015)



Simple cumul de la station Ageulmam Sidi Ali.
Période de (1980-2015)

Annexe 4 : Indice d'aridité annuelle

Année	Ifrane			Fès Saïss			Fès ABHS		
	P(mm)	T°C	IA	P(mm)	T°C	IA	P(mm)	T°C	IA
1974	740,0	11,0	35,2						
1975	1014,0	10,7	49,0						
1976	1143,0	10,4	56,0						
1977	932,0	11,0	44,4						
1978	932,0	11,1	44,2						
1979	1144,0	11,2	54,0	568,7	10,6	27,6			
1980	934,0	11,4	43,6	483,9	8,4	26,3			
1981	674,0	11,6	31,2	358,9	11,6	16,6			
1982	1045,0	11,8	47,9	483,4	7,8	27,2			
1983	653,0	12,1	29,5	513,5	10,8	24,7			
1984	624,0	11,8	28,6	252,6	10,5	12,3			
1985	851,0	11,7	39,2	466,8	10,1	23,2	402,5	19,1	13,8
1986	1002,0	12,1	45,3	375,5	9,2	19,6	415,3	18,2	14,7
1987	821,0	12,3	36,8	608,7	11,4	28,4	495,2	19,1	17,0
1988	772,0	12,3	34,6	377,6	8,6	20,3	365,8	18,7	12,7
1989	1274,0	12,0	57,9	621,1	12,4	27,7	592,9	19,1	20,3
1990	831,0	12,2	37,4	558,2	10,3	27,5	391,6	19,0	13,5
1991	980,0	11,3	46,0	398,3	10,7	19,2	375,1	18,2	13,3
1992	878,0	11,2	41,4	379,7	11,1	18,0	264,7	18,2	9,4
1993	711,0	11,7	32,8	503,6	9,5	25,8	270,7	17,6	9,8
1994	728,0	12,8	31,9	270,3	10,0	13,5	267,7	18,9	9,3
1995	856,0	12,4	38,2	382,1	11,4	17,9	263,1	19,3	9,0
1996	1865,0	11,7	85,9	391,2	9,6	20,0	692,3	17,8	24,9
1997	1161,0	12,3	52,1	646,6	10,9	30,9	467,2	18,8	16,2
1998	652,0	12,6	28,8	465,4	12,4	20,8	312,2	19,0	10,8
1999	852,0	12,6	37,7	312,2	11,2	14,7	205,7	18,7	7,2
2000	819,0	13,2	35,3	206,9	15,8	8,0	337,2	19,2	11,5
2001	655,0	13,2	28,2	336,6	16,2	12,8	247,1	19,3	8,4
2002	1006,0	13,5	42,8	248,0	16,5	9,4	441	18,9	15,3
2003	1233,0	9,3	63,9	441,7	16,2	16,9	537,3	19,2	18,4
2004	808,0	14,4	33,1	537,3	16,2	20,5	364,8	18,8	12,7
2005	641,0	14,8	25,8	364,6	15,7	14,2	231,5	19,2	7,9
2006	854,0	14,6	34,7	268,8	16,2	10,2	398,5	19,1	13,7
2007	623,0	12,9	27,2	462,3	15,9	17,9	297,1	18,4	10,5
2008	1070,0	13,9	44,8	690,0	15,5	27,1	657,9	18,4	23,2
2009	1335,0	14,5	54,5	622,5	15,4	24,5	704	19,0	24,3
2010	1226,8	16,9	45,5	635,8	15,9	24,6	655	18,9	22,6
2011	842,1	16,8	31,4	852,9	15,9	32,9	519,3	18,9	18,0
2012	680,7	16,6	25,5	533,5	15,7	20,7	430,4	18,6	15,0
2013	791,8	16,2	30,2	531,2	15,7	20,7	624,5	18,2	22,2

2014	688,6	16,8	25,7	431,0	15,2	17,1	431	18,8	15,0
2015	500,3	17,2	18,4	402,2	15,9	15,6	205	19,3	7,0
2016	614,6	17,4	22,4	625,19	16,1	23,9	732,42	19,5	24,9
2017	395,2	18,2	14,0	398,67	16,3	15,2	448,38	20,1	14,9

• **Indice d'aridité mensuelle à la station de Fès**

	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Janv.	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août
1985/1986	0,6	2,7	49,5	20,8	63,6	45,7	30,9	37,9	0,0	3,5	0,1	0,0
1986/1987	1,1	16,2	15,5	8,9	68,8	71,9	0,0	9,3	2,9	0,1	0,0	0,1
1987/1988	2,0	18,4	49,6	33,4	35,4	31,8	8,6	11,8	26,2	0,3	0,0	0,0
1988/1989	0,0	23,7	33,6	7,0	20,2	29,4	27,4	64,2	9,2	0,5	0,0	0,0
1989/1990	0,5	20,9	44,1	74,7	23,1	0,1	20,4	41,9	5,6	0,0	0,0	0,0
1990/1991	3,1	8,9	38,2	56,7	3,4	51,6	66,4	8,2	0,1	1,4	0,2	0,0
1991/1992	18,1	23,1	9,5	7,5	0,0	14,7	32,8	20,3	10,6	18,4	0,0	0,1
1992/1993	0,0	10,7	8,8	6,5	6,2	16,9	16,6	18,7	9,5	0,0	0,0	0,0
1993/1994	0,7	14,5	44,2	9,8	31,8	59,1	8,8	2,9	5,1	0,2	0,1	0,0
1994/1995	8,1	7,6	14,4	0,2	0,9	13,2	11,7	7,8	4,5	10,5	0,0	0,9
1995/1996	3,5	1,2	16,8	52,0	96,9	23,8	41,9	23,1	23,6	2,1	0,9	0,3
1996/1997	12,8	6,2	4,8	120,2	57,3	0,0	4,1	32,9	15,9	3,4	0,0	0,1
1997/1998	13,9	3,0	49,4	43,4	22,2	23,4	9,8	7,3	38,2	4,8	0,0	0,0
1998/1999	9,3	4,8	0,0	27,2	33,7	12,3	13,2	0,0	4,0	0,8	0,0	0,0
1999/2000	0,5	14,2	16,4	11,6	12,1	0,0	0,0	31,0	12,3	0,0	0,0	0,3
2000/2001	1,9	28,6	20,0	58,3	46,3	16,4	5,8	0,2	8,5	0,0	0,0	0,2
2001/2002	1,2	0,5	3,4	46,7	0,8	1,6	22,4	49,8	5,9	0,0	0,0	0,0
2002/2003	0,0	26,1	79,5	20,5	49,3	28,2	36,8	15,9	3,4	2,4	0,3	0,1
2003/2004	0,0	30,3	43,4	65,1	18,8	18,4	10,0	16,3	21,9	0,0	2,4	0,0
2004/2005	0,1	39,9	19,8	24,7	0,0	32,1	11,2	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0
2005/2006	0,0	15,5	39,6	16,0	72,7	49,0	28,1	15,5	10,2	4,2	0,0	0,0
2006/2007	3,4	7,4	5,9	18,1	14,5	21,1	21,6	52,1	2,4	0,0	0,0	0,0
2007/2008	0,5	9,8	20,0	5,7	27,9	41,2	7,7	13,0	6,7	0,0	0,0	0,0
2008/2009	34,4	50,5	56,0	92,0	64,0	46,1	38,4	4,0	0,4	5,1	0,0	10,4
2009/2010	1,5	8,6	71,8	101,5	63,8	89,1	31,7	0,0	5,1	1,5	9,8	0,0
2010/2011	18,1	45,9	22,7	26,6	29,4	26,2	26,7	29,4	36,6	2,8	0,7	0,0
2011/2012	7,1	19,4	57,8	5,8	15,1	7,8	5,9	49,4	3,4	0,7	0,7	0,0
2012/2013	11,3	10,4	90,7	14,0	79,5	40,9	98,0	7,8	5,2	0,6	1,7	10,0
2013/2014	10,2	0,0	48,8	19,6	71,7	24,4	9,9	9,0	0,0	0,0	0,0	0,6
2014/2015	0,0	5,5	69,8	36,6	46,5	20,1	24,9	1,3	1,9	2,1	0,0	0,3
2015/2016	3,0	18,4	6,0	0,0	21,4	75,3	41,6	21,9	24,6	1,0	0,8	2,8
2016/2017	1,0	30,6	64,0	81,4	34,4	56,3	18,9	8,4	8,9	0,3	0,4	3,3

- Indice d'aridité mensuelle à la station d'Ifrane**

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1978/1979	3,9	3,5	35,9	91,3	93,5	196,3	34,5	16,8	16,1	11,5	0,5	0,5
1979/1980	26,0	116,3	32,5	18,1	33,6	36,5	91,8	44,7	38,3	4,2	0,0	4,7
1980/1981	17,4	41,3	95,0	25,3	25,0	41,9	45,1	63,1	11,4	13,3	2,2	0,9
1981/1982	6,0	23,0	1,4	123,3	49,8	80,1	38,9	97,5	65,2	0,7	5,1	5,1
1982/1983	4,1	54,8	57,0	38,3	1,1	68,7	27,0	20,0	26,3	4,1	0,0	1,0
1983/1984	6,9	12,5	88,5	79,6	10,6	13,1	50,2	28,7	79,4	9,9	6,5	3,5
1984/1985	1,9	0,5	81,9	9,0	122,2	39,6	23,4	35,5	38,8	0,9	4,1	1,9
1985/1986	3,8	1,0	37,3	19,6	49,9	56,2	42,1	32,7	5,1	19,9	0,8	2,5
1986/1987	3,7	21,3	32,6	13,8	100,9	89,8	6,3	8,1	3,3	3,5	7,1	2,0
1987/1988	12,6	21,6	59,2	40,8	73,4	38,3	17,8	19,7	21,1	3,6	0,1	0,4
1988/1989	2,8	23,7	30,6	13,7	16,7	35,9	36,9	76,9	13,2	5,1	3,9	4,1
1989/1990	5,6	33,3	42,4	61,2	44,6	1,6	26,9	51,1	33,8	0,4	1,8	1,4
1990/1991	15,1	10,4	47,3	67,6	8,4	66,2	95,9	24,2	8,9	3,2	2,6	6,8
1991/1992	12,6	15,9	11,5	15,1	1,4	25,8	38,3	57,3	25,0	27,4	3,9	4,3
1992/1993	1,0	25,3	21,4	13,8	16,6	18,5	47,9	35,0	17,2	0,1	1,0	1,1
1993/1994	2,2	13,2	66,2	17,6	53,1	77,3	20,9	4,9	6,5	1,0	1,8	2,7
1994/1995	10,8	19,6	15,0	1,9	2,7	29,7	34,8	30,2	5,1	15,0	2,8	1,5
1995/1996	9,1	10,7	28,3	59,0	130,6	59,5	64,4	29,2	36,9	15,8	2,5	0,3
1996/1997	27,3	11,3	11,2	155,9	84,4	2,4	6,3	65,6	31,1	6,2	0,5	3,9
1997/1998	39,0	16,7	67,0	78,9	61,5	40,8	15,9	11,2	27,6	8,5	0,2	3,1
1998/1999	13,3	6,8	1,2	39,4	70,8	28,3	26,0	1,2	7,0	0,3	0,0	9,8
1999/2000	9,3	31,3	35,5	29,5	12,8	0,5	1,0	43,7	24,7	0,6	0,1	5,1
2000/2001	7,7	55,8	31,1	81,2	59,4	16,7	13,6	2,3	14,9	0,2	0,1	6,8
2001/2002	4,9	12,1	10,1	58,9	1,4	9,8	40,7	74,8	12,1	0,8	0,0	3,8
2002/2003	2,6	33,4	86,3	32,6	85,5	34,2	31,9	32,9	6,8	6,4	1,7	4,9
2003/2004	0,7	43,7	82,9	82,5	6,7	41,3	25,6	28,3	56,2	2,2	2,6	0,9
2004/2005	3,0	41,2	29,2	59,5	3,6	46,2	22,6	1,2	1,6	4,9	0,1	3,0
2005/2006	2,8	20,2	60,6	45,9	91,9	96,8	29,7	22,2	24,5	10,5	3,8	0,6
2006/2007	4,1	10,7	19,5	50,5	19,0	32,6	26,7	79,6	14,9	0,1	0,7	0,9
2007/2008	7,8	25,2	35,7	10,4	66,6	38,9	13,4	27,3	13,2	0,1	0,7	0,2
2008/2009	34,1	57,6	124,5	124,7	111,0	98,8	58,7	14,9	2,6	7,9	0,8	0,3
2009/2010	40,3	6,4	29,5	139,1	138,7	103,3	104,1	38,1	10,7	3,8	3,8	13,3
2010/2011	5,8	52,1	114,3	74,9	48,6	64,4	46,0	48,8	48,4	12,0	0,4	2,6
2011/2012	2,2	28,6	124,4	15,8	29,4	14,3	9,5	75,5	6,7	2,1	1,1	3,2
2012/2013	14,6	65,6	106,2	23,8	98,7	53,0	113,5	27,2	22,7	0,4	2,8	2,3
2013/2014	23,5	7,0	62,9	30,2	101,4	51,7	30,9	16,4	4,1	4,7	0,9	0,9
2014/2015	7,5	9,6	102,0	64,1	82,8	55,8	43,1	8,6	33,0	7,4	3,3	3,9
2015/2016	8,6	17,8	6,6	0,0	17,0	86,6	54,2	18,9	26,6	1,6	1,3	6,3
2016/2017	2,4	21,6	62,6	32,5	42,9	60,7	23,6	6,9	7,9	0,7	0,2	9,0

Annexe 5: ETP des stations Ifrane, Fès, Ain Taoujdate• **ETP d'Aïn Taoujdate (Thornthwaite)**

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
2008	22,4	28,7	39,1	64,8	74,6	143,5	165,9	154,2	102,7	56,2	25,3	17,5
2009	15,1	20,2	39,9	40,1	88,8	132,9	175,9	157,2	90,1	86,4	46,7	28,5
2010	22,2	30,2	38,9	60,7	76,8	105,5	169,3	179,4	115,2	61,6	30,6	26,4
2011	19,2	17,7	30,6	64,8	92,8	145,2	151,1	154,4	126,7	70,1	36,4	16,9
2012	14,6	12,6	37,5	37,8	109,1	136,8	165,8	172,4	110,9	71,2	63,4	6,9
2013	20,0	17,8	36,4	53,6	71,5	120,5	164,7	172,9	103,0	79,8	67,2	4,5
2014	20,4	20,6	33,2	61,7	108,8	114,8	140,4	150,8	105,1	90,4	40,0	18,2
2015	15,5	14,3	32,4	57,2	112,0	134,1	187,5	149,8	95,7	73,2	36,3	29,5

• **ETP d'Ifrane (Thornthwaite)**

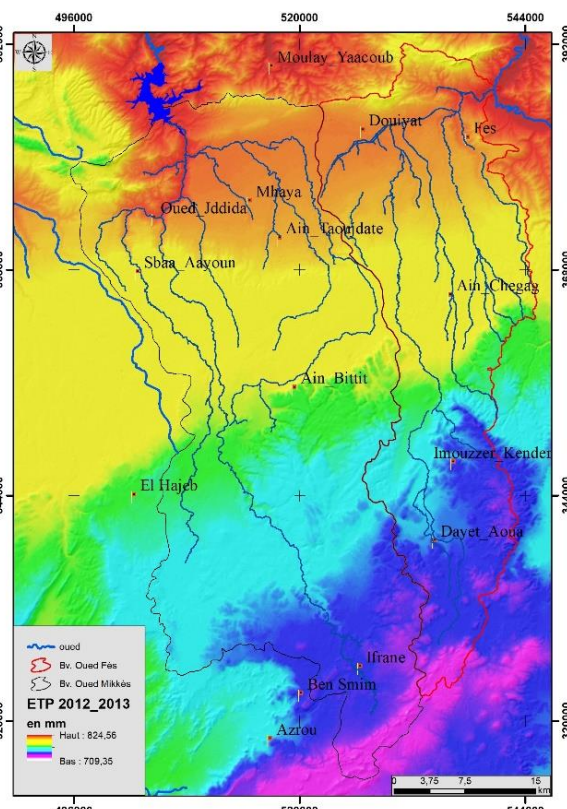
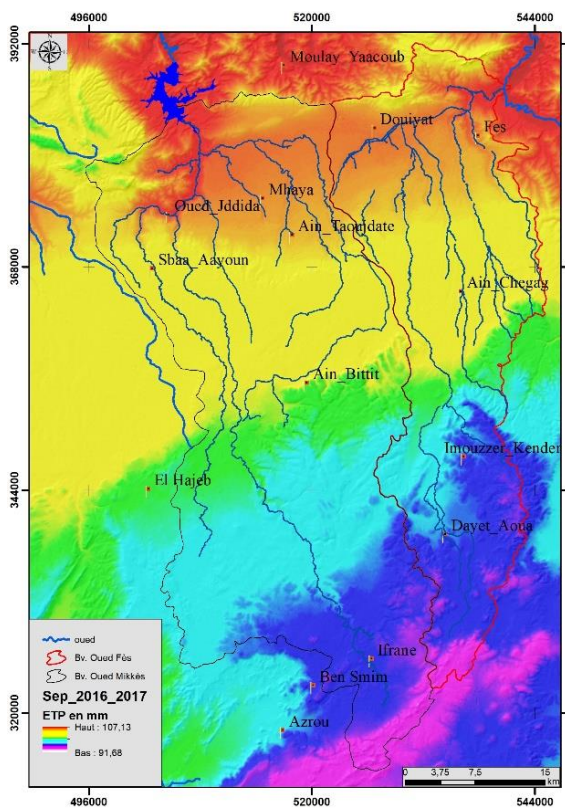
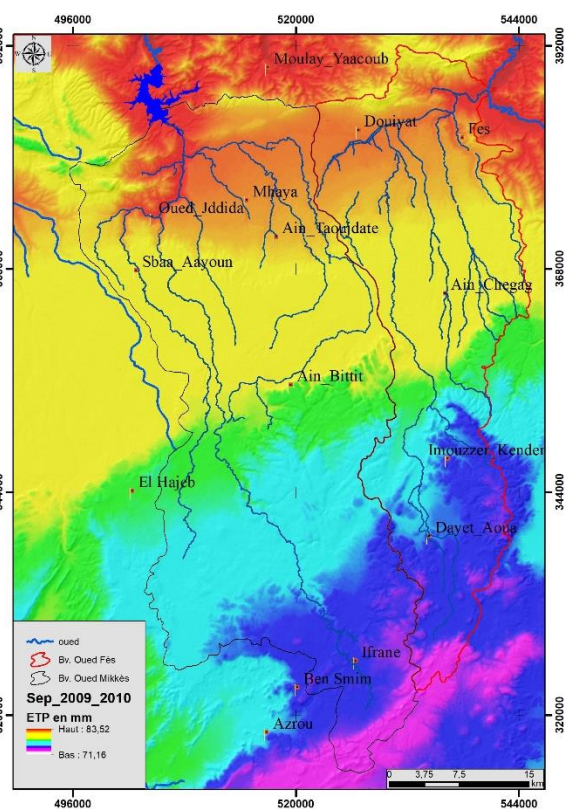
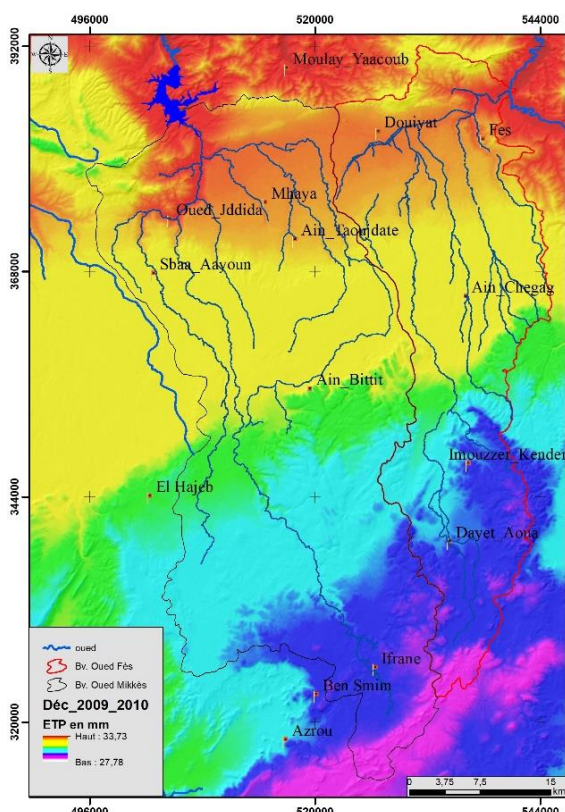
	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1978/1979	86,3	54,0	44,3	32,5	31,1	39,8	42,2	60,0	60,1	92,9	111,4	114,3
1979/1980	105,0	62,1	43,0	22,9	24,0	31,2	61,4	46,8	62,6	107,4	115,3	98,2
1980/1981	89,2	70,4	65,5	37,1	32,6	33,4	48,4	51,3	69,6	92,9	93,6	101,1
1981/1982	90,4	51,2	46,1	22,6	35,0	34,2	71,2	61,5	63,3	105,9	85,6	91,1
1982/1983	105,7	80,9	56,2	34,9	22,2	28,1	36,1	67,0	41,9	81,5	127,7	102,5
1983/1984	89,2	57,1	46,8	32,6	23,8	50,5	35,9	65,2	57,8	89,1	115,1	118,0
1984/1985	104,0	73,6	49,6	30,5	26,1	34,1	36,9	35,4	83,5	80,8	117,4	105,4
1985/1986	95,0	61,8	42,7	25,8	31,2	34,2	55,3	73,3	71,9	92,8	99,5	100,9
1986/1987	112,7	56,1	41,7	36,3	27,7	31,6	46,2	53,6	59,1	77,5	118,4	117,3
1987/1988	105,4	62,6	52,1	23,1	21,6	34,7	50,6	40,5	72,8	91,7	119,1	114,8
1988/1989	89,6	71,8	45,9	39,2	19,6	41,9	53,7	43,1	69,7	84,7	119,4	115,8
1989/1990	100,9	57,9	45,8	30,3	24,0	23,3	38,4	49,2	65,2	101,5	117,2	118,5
1990/1991	93,4	48,8	40,7	36,9	26,8	40,6	45,6	59,6	82,5	64,9	110,4	114,0
1991/1992	96,0	51,2	44,3	33,0	22,7	33,5	49,8	52,0	63,9	90,4	122,0	105,5
1992/1993	72,3	49,7	34,7	30,0	26,1	34,7	54,6	52,1	73,0	106,2	128,3	110,4
1993/1994	75,7	61,4	52,2	30,1	26,7	38,8	50,7	58,3	90,2	84,9	113,5	108,5
1994/1995	73,8	73,4	59,4	39,8	38,1	25,7	41,4	55,8	68,8	107,7	110,8	88,3
1995/1996	76,0	61,3	47,7	35,5	35,4	46,4	67,3	68,4	67,9	78,8	90,3	96,7
1996/1997	95,4	67,3	48,3	31,9	27,0	45,7	57,9	45,7	55,1	97,8	107,7	110,7
1997/1998	88,0	57,6	50,2	25,3	27,6	22,1	43,6	64,4	81,9	98,6	109,5	104,8
1998/1999	80,6	65,3	37,2	26,6	23,2	43,9	59,4	48,8	70,3	107,8	110,1	111,5
1999/2000	93,7	48,9	39,1	37,5	32,4	32,7	61,2	59,1	70,0	106,5	99,6	103,3
2000/2001	80,5	76,0	43,6	40,9	42,2	46,3	53,6	53,1	66,0	90,3	101,5	89,7
2001/2002	82,3	65,3	42,3	36,3	23,5	26,5	54,9	51,7	82,8	106,0	109,4	117,4
2002/2003	93,9	56,6	40,4	28,0	14,2	18,4	48,9	49,1	77,3	112,2	127,8	126,8
2003/2004	101,9	54,1	34,6	22,6	24,6	31,1	37,5	50,6	50,8	109,3	122,7	121,6
2004/2005	99,3	61,9	30,8	13,9	14,1	12,1	41,5	56,0	89,5	122,9	125,1	128,7
2005/2006	89,2	65,4	32,2	20,4	11,5	18,3	41,9	59,6	82,1	95,1	127,5	118,6
2006/2007	95,7	71,0	45,3	17,0	25,8	31,0	35,5	40,8	63,0	88,3	125,7	117,6
2007/2008	87,2	54,6	38,7	22,1	25,5	35,5	37,7	58,1	56,0	105,1	126,4	125,8

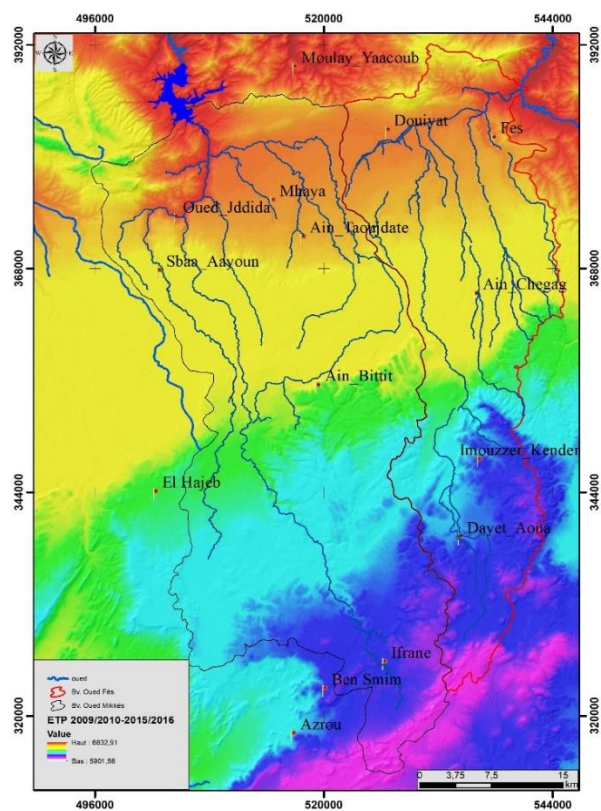
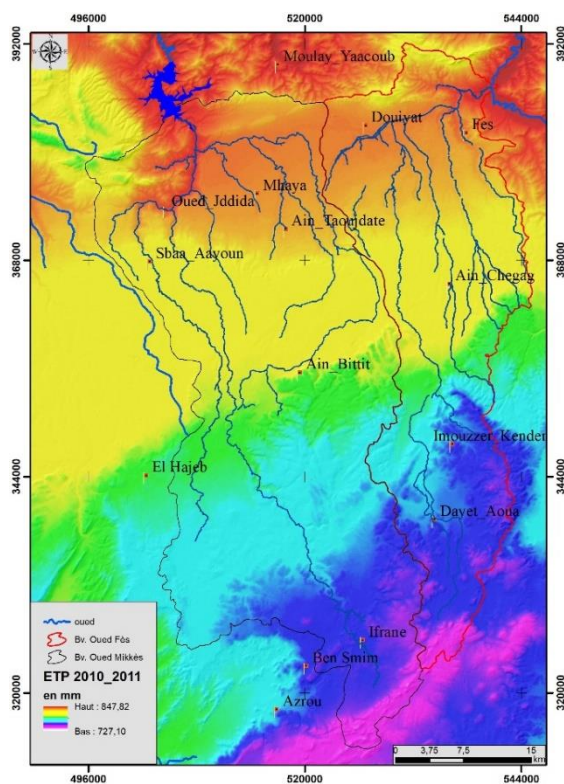
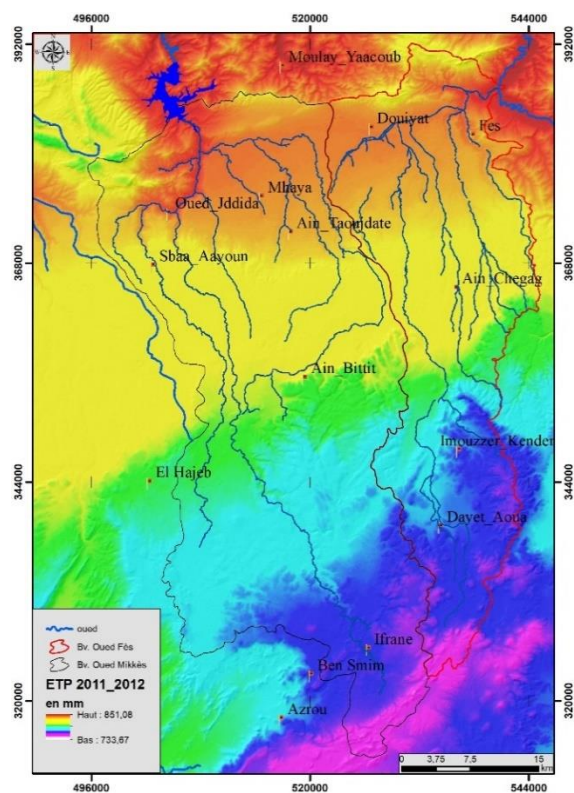
2008/2009	86,3	46,8	24,1	15,6	15,3	28,9	49,0	41,2	75,8	102,6	126,7	126,8
2009/2010	74,8	70,2	45,3	29,5	20,9	31,9	41,1	62,4	58,5	80,2	126,8	128,2
2010/2011	98,1	52,6	32,9	30,2	23,6	20,7	32,7	65,5	74,6	102,5	107,2	122,5
2011/2012	97,0	66,7	30,6	20,1	17,2	11,8	41,5	34,1	81,2	110,8	126,0	131,6
2012/2013	95,6	59,7	38,7	22,6	21,4	20,7	38,1	54,8	56,3	90,5	116,5	128,8
2013/2014	85,6	66,7	35,6	20,5	20,9	22,9	35,1	65,8	85,2	89,8	108,1	120,2
2014/2015	90,1	70,6	36,2	19,2	17,4	13,1	37,2	63,5	85,7	94,9	131,7	116,3
2015/2016	82,1	58,0	38,5	38,2	30,7	23,3	25,9	47,1	65,9	101,8	138,8	136,7
2016/2017	96,3	65,2	28,5	18,5	12,3	24,3	35,6	66,7	84,7	122,6	129,0	130,6

• **ETP de Fès (Thorntwaite)**

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1985/1986	121,5	77,7	44,9	25,9	21,3	26,8	34,6	34,2	88,6	94,9	133,6	123,2
1986/1987	107,7	60,7	39,5	23,6	28,3	29,6	50,8	69,8	76,6	108,0	116,0	118,8
1987/1988	123,5	54,3	38,3	33,4	23,1	30,2	44,8	54,6	61,7	82,0	135,8	144,6
1988/1989	119,2	61,0	48,1	21,0	21,1	30,5	48,5	39,5	72,2	101,4	139,9	134,7
1989/1990	100,9	71,6	43,0	34,4	17,9	40,7	55,8	43,0	73,7	93,7	134,8	136,2
1990/1991	111,3	60,4	43,2	24,7	21,4	20,6	36,5	47,8	65,2	110,8	135,6	141,6
1991/1992	109,8	49,5	38,1	34,9	24,8	39,3	45,9	63,0	84,8	68,9	118,4	127,1
1992/1993	109,3	48,8	42,5	29,6	22,5	32,2	46,4	51,7	63,0	99,3	140,1	122,4
1993/1994	76,1	49,1	32,0	26,9	22,5	29,7	50,1	50,8	76,6	120,2	152,7	132,6
1994/1995	85,2	59,4	48,6	28,3	24,6	37,5	48,6	57,5	94,7	96,1	126,8	124,2
1995/1996	79,5	79,1	60,2	35,4	34,4	23,5	42,6	56,6	66,0	106,8	116,3	103,8
1996/1997	79,3	59,5	44,2	31,6	32,3	44,9	62,7	68,4	70,2	87,8	105,9	114,9
1997/1998	104,4	65,5	43,4	27,8	26,2	43,9	54,0	44,5	58,6	106,0	127,4	135,8
1998/1999	96,0	57,9	50,4	25,1	22,4	19,5	40,3	65,3	85,8	116,6	131,5	126,1
1999/2000	88,1	64,1	33,3	22,5	19,9	45,1	56,1	46,0	78,1	123,5	131,5	138,1
2000/2001	104,0	48,1	33,8	31,9	25,0	31,1	54,9	59,8	70,0	128,2	118,1	128,4
2001/2002	94,3	75,3	39,5	36,1	35,5	39,6	49,2	52,9	68,1	105,0	124,1	106,3
2002/2003	91,3	62,7	38,9	30,1	18,8	22,2	53,1	52,9	83,8	120,9	132,9	140,9
2003/2004	109,3	58,7	38,8	25,4	27,5	34,7	40,0	53,6	55,1	121,0	132,8	132,6
2004/2005	108,1	66,5	35,7	18,5	16,9	16,3	45,7	60,0	94,6	134,8	128,6	137,2
2005/2006	96,9	71,2	36,1	23,7	16,1	23,0	43,4	62,3	87,7	103,1	138,8	129,8
2006/2007	108,6	76,3	50,8	21,9	27,5	34,3	39,2	45,9	66,8	94,2	131,3	123,1
2007/2008	94,1	61,0	43,7	25,4	29,4	39,3	41,3	64,0	61,2	115,4	130,4	129,4
2008/2009	93,5	52,0	28,8	20,2	20,3	32,3	53,5	44,9	78,6	113,8	136,5	137,0
2009/2010	81,8	75,3	50,4	32,9	26,0	35,4	43,7	64,0	61,8	86,1	133,7	143,0
2010/2011	107,6	56,0	35,8	33,6	27,5	24,7	37,2	70,0	81,6	113,3	113,7	130,1
2011/2012	104,8	75,9	36,1	22,3	21,4	15,9	44,8	38,7	88,5	119,9	128,9	137,6
2012/2013	103,5	63,5	43,3	27,7	26,3	23,5	41,0	58,9	60,3	95,1	122,8	142,7
2013/2014	94,0	71,8	40,1	24,4	25,1	26,2	39,0	70,4	92,5	98,0	111,2	124,8
2014/2015	96,4	77,1	41,4	22,7	21,2	17,0	39,4	64,9	91,5	106,4	142,1	126,0
2015/2016	88,1	64,2	43,4	42,5	34,6	27,6	28,7	50,5	69,0	109,0	147,1	149,4
2016/2017	105,0	70,4	33,5	23,1	16,1	28,2	39,1	68,5	88,4	131,8	131,3	142,1

Annexe 5 : ETP de la zone d'étude en différents périodes et mois





Annexe 7 : ETR des stations de Fès, Ifrane et Ain Taoujdate• **ETR Fès (Turc)**

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1985/1986	2,1	7,4	28,5	21,4	23,8	13,1	24,4	25,3	0,0	9,9	0,3	0,1
1986/1987	3,5	26,7	21,6	13,7	25,1	15,9	0,0	18,8	7,5	0,2	0,0	0,4
1987/1988	6,7	26,9	27,3	25,0	22,9	14,7	15,3	20,0	28,9	0,9	0,0	0,0
1988/1989	0,0	30,2	28,1	11,2	20,1	15,5	26,1	27,3	19,6	1,5	0,0	0,0
1989/1990	1,6	31,2	28,4	27,2	20,5	12,2	25,5	27,4	13,7	0,0	0,0	0,0
1990/1991	9,7	19,0	27,4	24,5	5,7	13,2	26,2	15,2	0,2	4,2	0,5	0,0
1991/1992	34,1	27,4	16,1	13,0	0,0	13,8	25,8	25,9	22,3	27,4	0,0	0,4
1992/1993	0,0	19,9	15,9	11,1	9,8	14,1	21,9	23,8	18,9	0,0	0,0	0,0
1993/1994	2,0	23,4	25,6	14,8	22,2	15,4	15,9	6,3	12,5	0,5	0,5	0,0
1994/1995	20,0	17,1	22,3	0,3	1,6	14,6	19,2	15,6	12,2	24,2	0,0	3,1
1995/1996	9,6	3,4	25,0	26,1	26,0	13,8	26,1	26,0	28,5	6,2	2,9	0,8
1996/1997	25,6	14,3	9,7	26,0	25,0	12,1	9,1	29,3	25,6	9,2	0,0	0,2
1997/1998	30,3	8,0	28,5	25,0	21,7	16,3	17,8	13,9	30,4	13,7	0,0	0,0
1998/1999	23,2	11,7	0,0	22,9	22,8	13,2	19,4	0,0	10,7	2,6	0,0	0,0
1999/2000	1,5	26,0	21,5	16,3	15,9	12,1	0,0	26,7	24,1	0,0	0,0	1,1
2000/2001	5,9	28,9	22,8	26,1	24,0	15,7	12,0	0,4	18,4	0,0	0,0	0,6
2001/2002	3,7	1,4	7,1	26,5	1,7	12,2	24,9	28,9	13,8	0,0	0,0	0,0
2002/2003	0,0	31,4	28,4	22,4	23,2	16,3	28,1	23,3	9,2	7,6	1,1	0,3
2003/2004	0,0	31,1	27,1	25,0	20,6	13,7	16,4	23,3	26,8	0,0	8,2	0,0
2004/2005	0,4	34,2	23,5	21,4	0,0	15,4	18,7	0,0	0,0	10,3	0,0	0,0
2005/2006	0,0	27,8	26,5	19,1	22,9	14,7	25,3	23,9	22,4	12,0	0,0	0,0
2006/2007	10,4	18,2	12,5	19,7	18,5	13,5	23,2	27,8	6,0	0,0	0,0	0,0
2007/2008	1,4	20,7	24,5	9,8	23,3	14,4	13,9	22,4	14,7	0,0	0,0	0,0
2008/2009	36,9	31,0	25,3	23,9	23,2	15,7	27,5	8,1	1,1	14,8	0,0	28,7
2009/2010	4,2	20,3	30,2	26,9	24,8	15,0	26,1	0,0	11,8	4,2	27,5	0,0
2010/2011	34,1	32,2	24,0	24,2	23,1	13,4	24,1	29,7	33,6	8,6	2,1	0,0
2011/2012	19,6	30,9	27,2	9,7	17,9	13,0	11,5	26,7	9,2	2,3	2,3	0,0
2012/2013	26,7	21,5	28,5	18,4	24,6	13,8	27,0	15,4	11,7	1,8	5,5	28,7
2013/2014	24,3	0,0	27,4	20,6	24,4	13,4	16,1	18,3	0,0	0,0	0,0	2,1
2014/2015	0,0	14,6	28,7	23,7	23,6	13,8	24,4	3,1	5,2	6,3	0,0	1,1
2015/2016	8,8	29,0	12,3	0,0	23,1	12,5	24,8	25,8	30,2	3,2	3,0	9,9
2016/2017	3,2	34,2	27,7	25,5	22,2	14,9	23,0	17,9	21,0	1,0	1,5	11,3
Moyenne	10,9	21,9	22,8	19,4	18,9	14,1	20,0	18,6	15,3	5,4	1,7	2,8

• **ETR Ifrane (Turc)**

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
1978/1979	10,6	8,1	26,3	25,4	24,7	26,2	24,7	23,3	23,8	24,3	1,6	1,5
1979/1980	36,6	33,1	26,0	19,1	22,1	23,5	29,3	26,7	29,7	12,0	0,0	13,3
1980/1981	30,5	33,5	31,7	23,7	22,5	24,4	26,7	28,1	21,4	26,6	6,4	2,6
1981/1982	15,6	26,5	2,8	23,5	24,3	24,7	28,7	29,2	30,2	2,0	13,4	13,9
1982/1983	12,1	36,1	29,7	25,0	1,8	24,3	23,2	26,0	25,0	10,7	0,1	2,9
1983/1984	17,7	22,3	28,4	25,6	14,5	19,8	24,9	27,9	30,2	22,0	18,7	10,9

1984/1985	5,6	1,4	28,9	14,1	24,3	24,3	22,5	24,4	33,0	2,5	12,6	5,8
1985/1986	23,9	22,0	27,5	24,5	25,1	25,6	28,0	31,3	11,8	30,7	5,7	11,7
1986/1987	12,9	27,8	25,6	21,6	24,5	25,1	6,7	18,4	23,6	6,5	11,6	6,7
1987/1988	23,6	24,2	29,2	24,0	23,6	25,6	25,8	24,5	30,1	7,8	0,0	1,4
1988/1989	2,9	32,6	28,4	21,1	21,4	26,9	28,0	27,5	24,6	31,3	19,6	33,2
1989/1990	23,6	30,4	28,2	25,3	23,4	0,0	24,1	27,8	22,8	2,0	19,0	23,0
1990/1991	34,1	17,8	26,4	26,1	5,9	26,1	26,8	27,1	14,3	19,3	11,9	24,6
1991/1992	36,1	30,1	22,7	23,0	1,4	24,5	27,2	28,2	29,4	35,1	2,0	20,5
1992/1993	3,1	29,5	18,2	20,0	20,6	23,9	27,4	27,4	24,8	5,8	7,7	24,2
1993/1994	23,5	30,8	29,6	20,6	24,3	26,4	27,2	11,6	19,5	0,0	21,3	10,3
1994/1995	29,7	28,1	27,4	5,8	5,1	23,4	26,3	28,2	10,5	30,9	4,7	10,5
1995/1996	23,6	23,4	27,2	26,0	25,6	26,9	29,8	29,7	30,7	23,4	30,3	11,6
1996/1997	32,5	26,1	26,3	26,0	24,6	7,1	24,9	27,7	26,3	16,3	4,0	13,1
1997/1998	36,6	29,9	28,9	24,3	23,7	23,4	24,2	24,8	32,0	14,6	8,8	12,9
1998/1999	24,3	8,5	5,5	24,6	23,6	26,3	27,3	6,5	24,9	0,6	0,0	18,7
1999/2000	26,2	29,9	26,8	26,0	22,4	0,0	0,0	29,1	28,7	10,0	5,4	15,1
2000/2001	29,4	35,0	27,3	27,3	26,7	14,1	25,3	10,7	28,0	0,4	0,5	10,5
2001/2002	24,1	8,1	21,0	26,8	0,0	5,4	28,6	28,8	27,3	3,2	0,0	1,6
2002/2003	1,8	32,0	27,8	24,5	22,3	22,5	27,1	27,9	24,6	16,2	17,9	16,9
2003/2004	5,7	30,8	26,0	23,8	2,0	24,4	24,7	27,4	28,3	9,9	24,2	2,8
2004/2005	8,4	32,1	24,7	22,3	11,8	21,6	25,3	0,0	2,8	34,2	9,2	13,5
2005/2006	7,4	31,9	25,5	22,6	21,3	22,6	25,6	26,9	32,2	31,9	21,9	7,0
2006/2007	5,5	18,3	24,4	21,2	18,1	24,1	22,7	26,3	20,5	1,2	5,4	3,4
2007/2008	14,8	28,1	26,1	19,2	23,3	25,0	12,8	26,6	27,2	2,8	12,7	20,7
2008/2009	33,8	29,0	23,8	22,1	21,8	24,0	26,7	12,5	27,7	30,1	7,7	3,8
2009/2010	33,8	22,6	25,8	25,2	23,3	25,1	26,3	28,9	19,1	23,0	28,3	33,1
2010/2011	27,6	30,8	25,8	25,0	22,8	22,3	24,5	29,1	32,3	18,7	3,6	21,6
2011/2012	15,8	33,0	25,6	20,6	21,6	11,6	19,4	25,4	8,0	12,5	0,4	1,7
2012/2013	35,4	32,0	26,6	19,6	22,9	22,4	25,5	27,4	24,2	9,5	5,5	7,8
2013/2014	35,0	2,2	26,1	22,8	23,0	22,8	24,0	28,1	8,4	11,8	6,2	2,4
2014/2015	14,5	19,7	26,7	23,0	22,6	21,2	25,5	5,3	32,5	21,7	15,0	27,0
2015/2016	20,2	27,6	27,2	26,7	24,9	23,7	24,2	27,6	28,8	4,6	4,5	19,7
2016/2017	7,1	29,5	25,8	23,2	22,0	23,9	24,9	14,6	18,3	2,1	0,8	25,7
Moyenne	20,7	25,5	25,3	22,8	19,5	21,4	24,3	23,8	24,0	14,6	9,5	13,0

• **ETR Aïn Taoujdate (Turc)**

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc
2008	22,9	25,1	15,4	23,0	16,2	0,0	0,0	0,0	30,5	29,6	25,3	23,7
2009	23,3	24,6	26,9	8,8	4,3	14,3	0,0	0,0	31,9	2,6	22,4	26,6
2010	25,1	27,0	27,3	25,8	17,7	22,4	13,5	8,7	0,4	29,1	27,0	24,7
2011	20,7	21,3	21,6	27,0	30,1	35,2	3,4	11,9	7,0	30,8	28,2	22,7
2012	17,6	7,8	10,0	25,1	2,4	1,4	0,4	0,0	18,9	32,1	32,4	19,3
2013	23,9	22,0	26,9	17,9	23,0	0,0	0,1	0,0	28,8	5,1	29,8	15,6
2014	24,1	22,1	12,6	21,9	0,7	0,6	0,0	0,0	0,7	13,6	28,5	21,8
2015	23,6	21,1	24,2	0,4	13,1	2,5	10,7	0,7	18,9	29,1	1,9	0,0
Moyenne	22,7	21,4	20,6	18,8	13,5	9,6	3,5	2,7	17,1	21,5	24,4	19,3

Annexe 8 : Feuille de jaugeage

rivière				jaugeage n°			
heure début :		fin :		date :			
bassin				code point			
code hydro				superficie du bassin versant	km ²		
PK				site			
commune				emplacement de la section :			
département							
système Lambert	x lambert	y lambert	z altitude				
équipe jaugeante :				station hydrométrique :		hauteur début : cm	
						hauteur fin : cm	
perche	☐	autre	☐	hélice : type	n°	diamètre	cm
saumon	☐	poids :		moulinet : type	n°	constante de fond :	cm
observations :							
n° verticale	abscisse (m)	profondeur (cm)	nombre de contacts	temps (s)	angle du câble (°)	observations	codage du jaugeage
R ---			/	/	/		- la section :
							type de section
							régulière ou canalisée ☐
							irrégulière ☐
							type de berges
							rives non abruptes <45° ☐
							rives abruptes >45° ☐
							r droite >45° et r. g. non ☐
							r gauche >45° et r. d. non ☐
							nature du fond du lit
							dépôts compacts ☐
							dépôts mous (fins) ☐
							galets ou blocs ☐
							rugosité
							ni obstacle ni végét. aq. ☐
							végétation aquatique ☐
							autres obstacles ☐
							végét. aq. et obstacles ☐
							- l'hydraulique :
							écoulement
							bien réparti ☐
							zones eau morte/retour ☐
							hauteur d'eau moyenne
							< 10 cm ☐
							> 10 cm ☐
							type d'écoulement
							"laminaire" - fluvial ☐
							très faible ☐
							tourbillonnaire ☐
							turbulent - torrentiel ☐
							niveau de l'eau
							variation nulle ou faible ☐
							rapide ou vannages ☐
section mouillée :		m ²	profondeur moyenne :		cm	résultats code :	
vitesse moyenne :		m/s	rayon hydraulique :		cm	débit :	
largeur :		m	périmètre mouillé :		m	l/s	
						m ³ /s	

Annexe 9 : Questionnaire de la perception des paysages hydrauliques

(VOIR PAGE SUIVANTE)



**Faculté des Sciences et
Techniques Fès**

**Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Fès – Saïss
Laboratoire d'Analyses Géo-Environnementales et
d'Aménagement (LAGEA-URAC54)**

**Laboratoire
HydroSciences Montpellier**

Nous effectuons une recherche scientifique portant sur la perception des habitants de Fès de la rivière « Oued Fès ».

Nous vous garantissons l'anonymat et la confidentialité de toutes les informations contenues dans ce questionnaire. Veuillez accepter nos sincères remerciements pour votre collaboration.

Nom d'enquêteur :..... Localisation :..... N. enquête :..... Date :

Questionnaire :

I. Fréquentation, accessibilité de lieu

1. Comment êtes-vous venu ici aujourd'hui ?

- ☐ A pied ☐ A dos d'animal ☐ Vélo ☐ Moto ☐ En taxi ☐ En Voiture
☐ En bus ☐ charrette

2. A combien de personne vous êtes venu ici ?

- ☐ Seul ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ >5

3. Que faites-vous ici aujourd'hui ?

- ☐ Le travail ☐ Passant ☐ Pique-nique ☐ Promenade ☐ Je cherche de l'eau pour boire ☐ Je fais boire mes animaux ☐ Je cherche de l'eau pour arroser mon jardin ☐ Je cherche de l'eau pour irriguer mes plantations ☐ Je me baigne ☐ Je pêche ☐ Je me repose dans un coin tranquille
☐ Je lave des habits ☐ Je lave des produits agricoles ☐ Je lave des peaux de bêtes (tanneur) ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre ☐ Je coupe du fourrage
☐ Autre.....

4. Fréquentez-vous souvent ce lieu ?

- ☐ Oui ☐ Non ☐ Quelque fois ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre

5. Si oui à quelle fréquence ?

- ☐ Une / 2 fois par an ☐ Une fois par mois ☐ Toutes les semaines ☐ Tous les jours
☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre

6. Depuis quand fréquentez-vous ce lieu ?

- ☐ Moins d'un an ☐ Un à 5 ans ☐ 5 à 10 ☐ Plus de 10 ans ☐ Toute ma vie

7. Si non pourquoi ?

- ☐ Je ne suis pas d'ici ☐ Pas le temps ☐ Les berges sont difficiles d'accès ☐ Pas d'intérêt/pourquoi je viendrais ? ☐ je ne suis pas à l'aise ici ☐ Ça sent mauvais ☐ Ce n'est pas beau ☐ Zone dangereuse ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre
☐ Autre

8. Qu'est-ce qui vous a poussé à venir aujourd'hui ?

- ☐ Mes amis/Ma famille ☐ J'ai entendu dire que ce coin était joli ☐ Je travaille
- ☐ C'est l'endroit le plus proche de l'eau ☐ Je persiste à dire que je ne suis pas sur les rives de l'Oued Fès ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre ☐ Autre

9. Combien de temps restez-vous sur place ?

- ☐ ... < 1h ☐ 1 – 2h ☐ ... > 3 h ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre

II. Paysages, ressources et qualité des eaux**1. Est-ce qu'à votre avis l'état général de ce paysage est ?**

- ☐ Très bon ☐ Bon ☐ Adéquat ☐ Mauvais ☐ Très mauvais ☐ Je ne sais pas

2. Est-ce qu'à votre avis le paysage de ce secteur de l'oued a changé ?

- ☐ Oui ☐ Non ☐ Je ne sais pas

3. Si oui, qu'est ce qui a changé ?

- ☐ Les berges ont été réhabilitées ☐ Les berges se sont érodées ☐ Il y a eu des constructions autour ☐ Il y a eu des démolitions autour ☐ Il y a eu des arbres/de la végétation plantés
- ☐ On a abattu des arbres/on a arraché la végétation ☐ Il y a des déchets (solides) dans la rivière
- ☐ Il n'y a plus de déchets dans la rivière
- ☐ Il n'y a plus d'animaux aquatiques dans la rivière ☐ Il y a à nouveau des animaux aquatiques dans la rivière
- ☐ il n'y plus d'animaux qui boivent ☐ Il y a à nouveau des animaux qui boivent l'eau de la rivière
- ☐ Autre....

4. Parmi les propositions suivantes, quelles sont celles qui illustrent le mieux ce que l'oued représente pour vous personnellement aujourd'hui ? (3 réponses maximum)

☐ Un cours d'eau pollué	☐ Un lieu où il y a diversités des usages de l'eau
☐ Un lieu associé à l'histoire de votre ville	☐ Une source de tranquillité
☐ Un cours d'eau que je ne vois pas	☐ Une eau que l'on ne peut pas utiliser
☐ Une contrainte pour la ville	☐ Une ressource pour l'industrie locale et l'agriculture
☐ Un atout pour le tourisme	☐ Un handicap pour le tourisme
☐ Un égout	☐ Une source de maladie
☐ Un élément qui offre des vues panoramiques	☐ Une ressource en eau accessible et proche
☐ Une source de catastrophes types crues et inondations	☐ Une valeur ajoutée pour le paysage de la ville
Autre:.....	

5. Est-ce que vous connaissez des actions réalisées sur l'oued Fès dans les dernières années ? (Max 5 ans)

☐ Oui ☐ Non

6. si oui, pouvez-vous en nommer ?

La nature de cette réalisation	Par qui ?	L'année
1-		
2-		
3-		

☐ Je sais qu'il y a eu des actions mais je ne connais pas les détails ☐ Je ne sais pas /je refuse de répondre

7. Y a t-il des zones dégradées à votre avis sur l'oued Fès ?

☐ Oui ☐ Non

8. Si oui, citez par ordre d'importance les zones dégradées qu'ils conviendraient de réhabiliter

La zone		Pollution	Qualité de l'eau	Paysage	Autre
1-	Pourquoi ?	☐	☐	☐	☐
2 -.....		☐	☐	☐	☐
3-		☐	☐	☐	☐

9. Y a t-il des zones réhabilitées à votre avis sur l'oued Fès ?

☐ Oui ☐ Non

10. Si oui, citez par ordre d'importance les zones dont il faut s'inspirer pour d'autres secteurs ?

La zone		Localisation	Qualité de l'eau	Paysage	Autre
1-	Pourquoi	☐	☐	☐	☐
2 -.....		☐	☐	☐	☐
3-		☐	☐	☐	☐

11 .Est-ce que vous connaissez ces oueds ?

	Oui	Non
☐ Boufekrane		
☐ El Mehraz	☐	☐
☐ El Himmer	☐	☐
☐ El Malleh	☐	☐
☐ Ain Chkef	☐	☐
☐ Ain Smen	☐	☐
☐ Oued Fès	☐	☐
☐ Oued Oum Rabbie	☐	☐

12. Est-ce que d'après vous la qualité des eaux de ce secteur est ?

☐ En très bon état ☐ En bon état ☐ Assez bon état ☐ En mauvais état ☐ En très mauvais état ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre

13. Pourquoi ? Quels critères ?

☐ Couleur ☐ Odeur ☐ Goût ☐ aspect
☐ Autre.....

14. Comment qualifiez-vous l'impact des industries sur l'oued Fès ? (Qualité)

☐ Très bon ☐ Bon ☐ Adéquat ☐ Mauvais ☐ Très mauvais ☐ Je ne sais pas

15. Avez-vous remarqué des changements de la quantité de l'eau d'oued Fès à long terme (10 ans) ?

☐ Oui ☐ Non ☐ Je ne sais pas /je refuse de répondre

16. Si oui :

☐ Augmente ☐ Diminue ☐ Stable ☐ Il change tout le temps

17. (Depuis quand ?)

☐ Avant 1980 ☐ 1980-2000 ☐ 2000- 2007 ☐ après 2007

18. Pensez-vous que l'eau de l'oued Fès est utilisée comme eau d'irrigation

☐ Oui ☐ Non ☐ Je ne sais pas / je refuse de répondre

19. Si oui, la qualité de ces eaux utilisées pour l'irrigation est :

☐ Très bonne ☐ Bonne ☐ Adéquate ☐ Mauvaise ☐ Très mauvaise
☐ Je ne sais pas ☐ Sans intérêt

20. Pensez-vous que l'eau de l'oued Fès puisse être utilisée pour l'irrigation ?

☐ Oui, un peu ☐ Oui, beaucoup ☐ Non pas du tout

21. Si Non Pourquoi ?

22. Pensez-vous que l'eau de l'oued Fès est utilisée comme eau potable ?

☐ Oui ☐ Non ☐ Je ne sais pas / je refuse de répondre

23. Pensez-vous que l'eau de l'oued Fès puisse être utilisée comme eau potable ?

☐ Oui, un peu ☐ Oui, beaucoup ☐ Non pas du tout

24. Si non pourquoi ?

25. Quelle photo représente une zone dégradée à votre avis ?

Photo n° :

26. Pourquoi (quels critères) ?.....

27. quelle photo représente une zone en bon état d'après-vous ?

Photo n° :

28. Pourquoi (quels critères) ?.....

29. Si l'on vous donne des ressources financières suffisantes pour réaliser un projet sur l'oued Fès que feriez-vous ?

.....

III. Profil de l'enquête1. Sexe : ☐ Homme ☐ Femme

2. Age :

3. Vous êtes ?

☐ Célibataire ☐ Marié ☐ Veuf ☐ Divorcé

4. Quel est le lieu de votre naissance ?

☐ Ville (Fès) ☐ Rural ☐ Autre rural ☐ Autre urbain ☐ Étranger

5. Date d'arrivée à Fès

6. Pour quelle raison ? ☐ Travail ☐ École ☐ Hôpital ☐ Mariage☐ Famille ☐ Je cherche du travail ☐ J'ai trouvé du travail☐ Autre.....

7. Quelle est la Distance entre oued Fès et votre domicile (Km) ?

☐ 0 – 1 ☐ 2 – 3 ☐ 4 – 5 ☐ ...> 6 Km

8. Quel est votre niveau d'enseignement ?

☐ Sans ☐ Programme d'alphabétisme ☐ Primaire ☐ Secondaire ☐ Supérieure

9. vous êtes ?

☐ Actif ☐ Femme au foyer ☐ Etudiant ☐ Chômeur ☐ Rentier ☐ Retraité ☐ Autre

?

10. Quelle est votre situation professionnelle ?

☐ Salarié public ☐ Salarié privé ☐ Indépendant ☐ Employeur

11. Quelle est votre activité principale ?

☐ Commerce ☐ Service ☐ Fonctionnaire ☐ Artisanat ☐ Industrie☐ Agriculture ☐ BTP ☐ Transport ☐ Enseignement ☐ Militaire☐ Autre?

12. Vous travaillez ?

☐ A Plein temps ☐ A Mi-temps ☐ Saisonnier

13. Quel est votre lieu de travail ou d'étude ?

☐ Ville (Fès) ☐ Rural ☐ Autre rural ☐ Autre urbain ☐ Étranger

14. Comment vous déplacez-vous majoritairement ?

☐ A pied ☐ Animal ☐ Vélo ☐ Moto ☐ Taxi ☐ Voit ☐ Bus☐ Autres?

15. Revenu par mois (en DH) :

☐ [...<2000] ☐ [2000 – 4000] ☐ [4000 - 6000] ☐ [6000 – 8000] ☐ [...> 8000]☐ Je ne sais pas ☐ je refuse de répondre

16. Êtes-vous satisfait de votre situation financière :

☐ Très satisfait ☐ Satisfait ☐ Peu Satisfait ☐ Insatisfait

IV. Pour les habitants de Fès

1. Le niveau de vie dans votre quartier est :

☐ Très bon ☐ Bon ☐ Adéquat ☐ Mauvais ☐ Très mauvais ☐ Je ne sais pas

2. Quelle eau buvez-vous ?

☐ Eau en bouteille ☐ Eau du robinet ☐ Eau de votre puits ☐ Eau de l'oued ☐

Source

☐ Autre.....

3. Pourquoi ?.....

4. Est-ce que vous utilisez l'eau de la rivière ?

☐ Oui ☐ Non

5. Si oui

☐ Pour boire ☐ Pour arroser votre jardin ☐ Pour faire le ménage ☐ Pour faire boire vos animaux ☐ Pour laver quelque chose

☐ Autre.....

6. L'eau de quel secteur de l'oued Fès vous utilisez ?.....

7. Si non pourquoi ?.....

8. L'évacuation des eaux usées dans votre quartier est :

☐ Très bonne ☐ Bonne ☐ Adéquate ☐ Mauvaise ☐ Très mauvaise ☐ Je ne sais pas

9. Comment pensez-vous que les eaux usées sont gérées dans le périmètre de l'oued Fès ?

☐ Très bien ☐ Bien ☐ Moyennement ☐ Mal ☐ Extrêmement mal ☐ Je ne sais pas/je refuse de répondre

10. Est-ce que l'Oued Fès a joué un rôle dans votre intérêt pour la région ?

☐ Peu ou pas important ☐ Important ☐ Très important ☐ Sans opinion

11. Pourquoi

* * * * *

Remarques

.....

Merci

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude au centre du bassin versant de Sebou.....	7
Figure 2: Limites des bassins versants des oueds Fès et Mikkès	9
Figure 3: Les unités administratives couvertes par les bassins des oueds Fès et Mikkès.....	10
Figure 4: La démarche suivie	13
Figure 5: Schématisation du contenu de la thèse	15
Figure 6: Les bassins versants des oueds Fès et Mikkès	19
Figure 7: Carte structurale de la zone d'étude et ses bordures.....	21
Figure 8: Coupe géologique schématisée du bassin Fès-Meknès (d'après : Combe, 1963).....	23
Figure 9: Coupe schématisée illustrent les variations latérales de faciès d'est en ouest dans le néogène supérieur du Saïss	24
Figure 10: Organisation du réseau hydrographique actuel.....	26
Figure 11: Carte synthétique des domaines lithologiques couvrant la zone d'étude.....	28
Figure 12: Spatialisation des degrés de perméabilité dans les BVs oued Fès et oued Mikkès	30
Figure 13: Bassin versant oued Mikkès	33
Figure 14: Bassin versant oued Fès	33
Figure 15: Sous bassin versant oued Boufkrane	34
Figure 16: Sous bassin versant de l'oued El Mehras	34
Figure 17: Sous-bassin versant de l'oued El Himmer	34
Figure 18: Sous bassin versant de l'oued Chekkou	34
Figure 19: Sous bassin versant de l'oued El Malleh	35
Figure 20: Sous bassin versant de l'oued Atchane.....	35
Figure 21: Sous bassin versant de l'oued N'Ja.....	35
Figure 22: Sous bassin versant d'Ain Taoujdate.....	35
Figure 23: Sous bassin versant Mehdoma.....	36
Figure 24: Sous bassin versant de l'oued Tizguit.....	36
Figure 25: Sous bassin versant de l'oued Jdidda	36
Figure 26: Sous bassin versant Sbaa Ayoun	36
Figure 27: hypsométrie des deux bassins versants de l'oued Fès et l'oued Mikkès.....	40
Figure 28: Courbes hypsométriques du BV oued Fès et ses SBVs.....	44
Figure 29: Courbes hypsométriques du BV oued Mikkès et ses SBVs	44
Figure 30: Carte des pentes du BV oued Fès.....	49
Figure 31: Carte des pentes du BV oued Mikkès.....	49
Figure 32: Classes de pentes du BV Oued Fès	49
Figure 33: Classes de pentes du BV Oued Mikkès.....	49
Figure 34: Réseau hydrographique des deux bassins versants oueds Fès et Mikkès	52
Figure 35: Profil en long oued Mikkès.....	60
Figure 36: Profil en long de l'Oued Fès.....	60
Figure 37: Occupation du sol de la zone d'étude	64
Figure 38: Type de climat selon l'indice d'aridité de De Martonne	71
Figure 39: Localisation des stations météorologiques et postes pluviométriques	73
Figure 40: la situation altitudinale des stations et postes pluviométriques exploitées.....	74
Figure 41: Résultat de la méthode du Vecteur Régional.....	77

Figure 42: Vecteur des indices annuels de précipitation et indices des stations sur la période 1977-2015.....	78
Figure 43: Simple cumul de la station de Fès Saïss (1915-2015).....	79
Figure 44: Simple cumul de la station de Fès (ABHS) (1972-2015).	79
Figure 45: Simple cumul de la station d'Ifrane (1935-2015).	79
Figure 46: Simple cumul de la station d'El Hajeb (1915-2015).	79
Figure 47: Double cumul pour la station de Fès (ABHS) et Fès Saïss (1972-2015)	80
Figure 48: Double cumul pour la station d'El Hajeb et Ain Bittit (1978-2015).....	80
Figure 49: Double cumul pour les stations d'Imouzzer Kander et Ifrane (1969-2015)	80
Figure 50 : Double cumul pour les stations d'Aïn Louh et Azrou (1975-2015)	80
Figure 51: variabilité des totaux annuelle des précipitations par apport à la moyenne de la station de Fès Saïss pour la période de (1914/1915) - (2014-2015)	82
Figure 52: variabilité annuelle des précipitations par apport à la moyenne de la station d'Ifrane pour la période de (1934/1935) - (2014-2015).....	83
Figure 53: variabilité annuelle des précipitations. (Ifrane, Fès (ABHS) Aïn Bittit, Fès Saïss) (1980-1981/2014-2015).....	83
Figure 54: Moyenne mensuelle de la période de (1979/1980-2014-2015)	84
Figure 55: Précipitations mensuelles maximales (1978-1979 /2014-2015).....	85
Figure 56: Pluie maximale mensuelle interannuelle (1978/1979-2014/2015)	86
Figure 57: Distribution des précipitations moyennes saisonnière. (1978/1979-2014/2015).....	87
Figure 58: Les pluies moyennes printanières de la période (1978/1979-2014/	89
Figure 59: Les pluies moyennes hivernales de la période (1978/1979-2014/2015).....	89
Figure 60: les pluies moyennes automnales de la période (1978/1979-2014/2015)	89
Figure 61: Les pluies moyennes estivales de la période (1978/1979-2014/2015).....	89
Figure 62: Schéma simplifié le Cext et leur fonction sur l'hétérogénéité des séries de données	91
Figure 63: CUSUM des précipitations à la station de Fès Saïss (1915-2015) et moyenne pour les 3 périodes homogènes (100ans).	92
Figure 64: CUSUM des précipitations à la station de Sefrou (1915-2015) et moyenne pour 2 période homogènes (100 ans).	92
Figure 65: Ajustement statistique des pluies annuelles des stations de Fès Saïss et Ifrane à la loi Log Normale (1976-2015).	94
Figure 66: Relations entre les précipitations annuelles et l'altitude (1978-1979/2014-2015).	95
Figure 67: Spatialisation des pluies moyennes annuelles en mm par la méthode d'interpolation. (1978-1979/2014-2015)	97
Figure 68: Carte des stations météorologiques et stations issues du Climat-Model.....	98
Figure 69: Température interannuelle de la période de 1961-2009.....	99
Figure 70: Spatialisation des températures moyennes annuelles en °C par la méthode du Gradient Thermique (1982-2017).	100
Figure 71: Variation de la température avec l'altitude	100
Figure 72: Température moyenne mensuelle pour les stations de Fès, Meknès, Aïn Bittit, Ifrane et Imouzzer Kander.....	101
Figure 73: Distribution des températures moyennes saisonnière.....	101
Figure 74: Température moyenne automnale par la méthode du Gradient Thermique	102
Figure 75: Température moyenne estivale par la méthode du Gradient Thermique.....	102
Figure 76: Température moyenne hivernale par la méthode du Gradient Thermique	102

Figure 77: Température moyenne printanière par la méthode du Gradient Thermique	102
Figure 78: Indice d'aridité des stations de Fès (ABHS), Fès Saïss et Ifrane pour la période de (1985/2017)	104
Figure 79: Diagramme ombrothermique des stations Fès, Meknès, Aïn Taoujdate, Aïn Bittit, Ifrane et Imouzzer Kander	106
Figure 80: L'évapotranspiration mensuelle de la période (1985-1986/ 2016/2017)	108
Figure 81: L'évapotranspiration annuelle des stations de Fès et Ifrane (1985-1986/ 2016/2017)	108
Figure 82: Relation entre l'ETP, précipitation et la température de la station de Fès pour la période de 1978-1979/2016-2017	109
Figure 83: Relation entre l'ETP, précipitation et la température de la station d'Ifrane pour la période de 1978-1979/2016-2017	109
Figure 84: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (2015/2016)	109
Figure 85: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (2013/2014)	109
Figure 86: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (Sep. 2013/2014)	110
Figure 87: ETP dans les bassins versants des oueds Fès et Mikkès (Déc. 2013/2014)	110
Figure 88: Surplus et déficit hydrique à Fès	113
Figure 89: Surplus et déficit hydrique à Ifrane	113
Figure 90: Relation entre ETP et ETR par rapport avec la température et les précipitations à la station de Fès (1985-1986/ 2016-2017)	113
Figure 91: Relation entre ETP et ETR par rapport avec la température et les précipitations à la station d'Ifrane (1985-1986/ 2016-2017)	113
Figure 92: Principe du jaugeage par dilution	121
Figure 93: Jaugeage ADCP ; profil en travers, et distribution des vitesses dans la section Rio Amazonas à Obidos, Brésil, 16/12/2003	124
Figure 94 : Débit et champ des vitesses à travers une section.	126
Figure 95: une verticale dans une section de jaugeage.	126
Figure 96: Exemple d'un site de mesure dans une section de jaugeage	129
Figure 97: Interface du logiciel DEPJAU	130
Figure 98: les sous bassins jaugés avec leurs points de jaugeage	133
Figure 99: Profil hydrologique de l'oued Fès en différentes situations hydrologiques	135
Figure 100: Profil hydrologique de l'oued Ain Chkef en différentes situations hydrologiques	138
Figure 101: Profil hydrologique de l'oued El Mehraz en différents situations hydrologiques	140
Figure 102: Profil hydrologique de l'oued Boufkrane en différents situations hydrologiques	141
Figure 103: Profil hydrologique de l'oued Tizguit en différentes situations hydrologiques	143
Figure 104: Méthodologie adopté pour la représentation du rendement hydrologique	147
Figure 105: rendement hydrologique par bassin unitaire (Sep. 2014)	148
Figure 106: rendement hydrologique par bassin unitaire (Sep. 2015)	148
Figure 107: rendement hydrologique par bassin unitaire (Sep. 2016)	149
Figure 108: Rendement hydrologique par bassin unitaire (Avril. 2015)	152
Figure 109: Rendement hydrologique par bassin unitaire (Avril. 2016)	152
Figure 110: Rendement hydrologique par bassin unitaire (Avril. 2017)	153
Figure 111: Les différentes nappes hydrogéologiques caractérisant la zone d'étude	158
Figure 112: Extension des nappes de Saïss et du Moyen Atlas	159
Figure 113: Coupe lithologique du forage N°IRE 1864/22	160
Figure 114: Les différents éléments d'alimentation et de décharge de la nappe phréatique	162

Figure 115: Abaissement du niveau piézométrique de la nappe phréatique du Saïss entre 1981 et 2014 selon le piézomètre 2366/15.	163
Figure 116: Evolution piézométrique de la nappe de Saïss entre 2006 et 2016.....	164
Figure 117: Evolution du niveau piézométrique (en m) entre février 1985 et février-mars 2005	165
Figure 118: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2279 avec la station de Fès-Saïss.....	166
Figure 119: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2279 avec la station d'Ifrane	166
Figure 120: Coefficient de détermination du piézomètre 15/1179 avec la station de Fès-Saïss.....	166
Figure 121: Coefficient de détermination du piézomètre 15/1179 avec la station d'Ifrane	166
Figure 122: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2813 avec la station de Fès-Saïss.....	167
Figure 123: Coefficient de détermination du piézomètre 15/2813 avec la station d'Ifrane	167
Figure 124: Niveau piézométrique (15/2253) par rapport aux pluies mensuelles des stations de Fès-Saïss et d'Ifrane	168
Figure 125: Niveau piézométrique (15/3321) par rapport aux pluies mensuelles des stations de Fès-Saïss et d'Ifrane	169
Figure 126: Niveau piézométrique (15/1813) par rapport aux pluies mensuelles des stations de Fès-Saïss et d'Ifrane	169
Figure 127: Méthodologie adoptée pour le modèle empirique	171
Figure 128: Les zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines	172
Figure 129: Localisation des sources dans les deux bassins versants étudiés	175
Figure 130: Facteurs et paramètres descriptifs de l'infiltration.....	177
Figure 131: Localisation des coupes hydrogéologiques.....	178
Figure 132: Coupe (1) hydrogéologique schématique du système de débordement Bittit - Sid Lmir. (Bahzad, (1986))......	179
Figure 133: Coupe (2) hydrogéologique schématique du complexe d'Ageumgeum, Ribaa e Atrous. (Bahzad, (1986))......	179
Figure 134: Coupe (3) hydrogéologique schématique du système artésien (Akkous)......	180
Figure 135: Infiltration efficace en % en amont des bassins versants étudiés	181
Figure 136: Variation des débits de la source Ain Sultane	182
Figure 137: Variation temporelle des débits des source Ribaa amont et aval.....	183
Figure 138: Variation des débits de la source d'Ageumgeum.....	185
Figure 139: Variation des débits de la source de Bittit	185
Figure 140: Variation des débits de la source d'Ain Chkef.....	187
Figure 141: Variation des débits de la source Amellal	188
Figure 142: Variation saisonnière des débits des sources Bittit et Ribaa amont	190
Figure 143: Schéma simplifié de la méthode adopté pour l'analyse de la relation pluie-débit	191
Figure 144: Relation pluie débit de la source Ribaa (janv. 1978 / Déc. 2014)	191
Figure 145: relation Pluie-Débit de la source d'Ageumgeum (Févr.1980 / Sept. 2014)	191
Figure 146: Relation Pluie de la source d'Ain Sultane (Janv.1994 /Déc.2014).....	191
Figure 147: Relation Pluie-Débit de la source d'Ain Chkef (Mai.81 / Mai.1988).....	191
Figure 148: Relation Pluie-Débit de la source Ras El Ma (Mars. 2010 / Nov. 2014)	192
Figure 149: Relation Pluie-Débit de la source d'Amellal (janv.1985 / Sept.2014)	192
Figure 150: relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source de Ribaa	193
Figure 151: Relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source d'Ageumgeum.....	193
Figure 152: Relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source d'Ain Sultane	193
Figure 153: Relation Pluie (Station de Fès Saïss) débit de la source d'Ain Chkef.....	194

Figure 154: Relation Pluie (Station d'Ifrane) débit de la source de Ras El Ma	194
Figure 155: Relation Pluie (Station Meknès) débit de la source d'Amellal	194
Figure 156: Précipitation journalière à Ifrane et turbidité de la source Ribaa.	197
Figure 157: Répartition des points des prélèvements à partir des eaux superficielles	199
Figure 158: Types des systèmes d'irrigations en %	199
Figure 159: Évolution du nombre des points d'eau au niveau du Saïss.....	201
Figure 160: Projet de transfert d'eau vers le Saïss.....	201
Figure 161: Complexe d'alimentation en eau potable des villes Fès et Meknès. (Données 2004).....	202
Figure 162: Localisation des cinq sites d'enquêtes réalisés	205
Figure 163: Perception des mutations de paysages hydrauliques.....	208
Figure 164: Les mots les plus fréquents dans les réponses liées aux projets proposés	210
Figure 165: Les quatre projets proposés par les enquêtés	210

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Le bassin hydraulique de Sebou en chiffre.....	8
Tableau 2: Les sous-bassins versants des oueds Fès et Mikkès	20
Tableau 3: Surfaces et pourcentages des degrés de perméabilités par rapports aux surfaces	31
Tableau. 4 : correspondance entre la valeur de Kc et le type de réponse hydrologique attendue.....	37
Tableau 5: les indices de forme pour les sous bassins versants de l'oued Fès et Mikkès.....	38
Tableau 6: Longueur et largeur du rectangle équivalent des SBVs de l'oued Mikkès et l'oued Fès.....	39
Tableau 7: Répartition hypsométrique dans le bassin versant de l'oued Fès.....	42
Tableau 8: Répartition hypsométrique dans le bassin versant de l'oued Mikkès.....	42
Tableau 9: Altitudes caractéristiques du BV oued Fès et ses SBVs	45
Tableau 10: Altitudes caractéristiques du BV oued Mikkès et ses SBVs	46
Tableau 11: Correspondance type de relief et Dénivelé spécifique	47
Tableau 12: Dénivelé Spécifiques des bassins versants des oueds Fès et Mikkès et leurs SBVs	48
Tableau 13: Hiérarchisation du réseau hydrographique du BV oued Mikkès.....	59
Tableau 14: Hiérarchisation du réseau hydrographique du BV oued Mikkès.....	59
Tableau 15: Pentes moyennes de l'oued Mikkès et ses affluents (m/km)	61
Tableau 16: Pentes moyennes de l'oued Fès et ses affluents (m/km)	61
Tableau 17: Temps de concentration calculés pour les oueds Mikkès et Fès et leurs affluents	63
Tableau 18: Caractéristiques des stations météorologiques utilisées	72
Tableau 19: Comblement des lacunes par le vecteur régional (Mois juin, station de Fès (ABHS), sous Hydraccess.....	76
Tableau 20: Coefficients de corrélation obtenus par la méthode de vecteur régional	76
Tableau 21: Moyenne mensuelle de la période 1979/1980-2014/2015	84
Tableau 22: Distribution des précipitations moyennes saisonnières. (1978/1979-2014/2015).....	88
Tableau 23: Résultat du découpage des données de pluies annuelles de la station de Fès Saïss, et Sefrou par la méthode de segmentation de Hubert. (Période : 1914-1915/2014-2015)	91
Tableau 24: Les pluies classées et leurs fréquences à station de Fès Saïss et Ifrane (1976/2015).....	94
Tableau 25: Précipitations annuelles fréquentielles pour la période (1976-2015), loi Ln-Normale.....	95
Tableau 26: Relations entre les précipitations moyennes annuelles (1978-1979/2014-2015) et l'altitude	96
Tableau 27: les différents types du climat selon chaque station.....	104
Tableau 28: Indice d'aridité mensuelle Aïn Taoujdate (2007-2008/2015-2016)	105
Tableau 29: l'évapotranspiration mensuelle de la période à Fès et Ifrane (1985-1986/ 2016/2017)	108
Tableau 30: ETR calculé à Fès et Ifrane (1985-2017)	111
Tableau 31: Résultats des calculs les surplus hydriques moyens mensuels (SH) et les déficits hydriques moyens mensuels (DH) à la station de Fès pour la période de 1985-1986/ 2016-2017.....	112
Tableau 32: Résultats des calculs les surplus hydriques moyens mensuels (SH) et les déficits hydriques moyens mensuels (DH) à la station d'Ifrane pour la période de 1985-1986/ 2016-2017.....	112
Tableau 33: Abréviation des indices utilisés dans le manuscrit	128
Tableau 34: dépouillement d'un point de jaugeage de la source de Bergama El Kbira.....	131
Tableau 35: les points codés et jaugés pour les oueds de Fès et Mikkès avec leurs superficies.....	132
Tableau 36: Coefficient de détermination des piézomètres avec les stations de Fès-Saïss et Ifrane	167
Tableau 37: Sources localisées dans les deux bassins versants étudiés	175
Tableau 38: Sources ayant séchées au niveau de Saïss.....	186

Tableau 39: Variations saisonnières des débits des sources Ribaa Amont et Bittit.....	189
Tableau 40: Coefficients de détermination des 6 sources avec les stations de contrôle	192
Tableau 41: Superficie irriguée selon les différents systèmes d'irrigation (par hectares).	198
Tableau 42: structure générale du questionnaire.....	204

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Vue panoramique de du plateau de Saïss Fès (1 avr 2015)	23
Photo 2: Flexure d'Aïn Taoujdate	24
Photo 3: Formation du calcaire lacustre (carrière de Bou Rkaiz. (15 fév.2018).....	29
Photo 4: Calcaire au niveau de l'aval de l'oued Tizguit (20 sept .2015)	29
Photo 5: Blocks du basalte au niveau du dir. (12 Avr. 2015).....	29
Photo 6: Affleurement des formations conglomératiques d'Ain Chkef (près de la Source Ain Chkef). (3 Mars 2016)	29
Photo 7: Marne bleu au niveau des rides prérfaines. (Déc. 2019).....	29
Photo 8: Travertins au niveau du Borj-nord de Fès.....	29
Photo 9: Image satellite du barrage Sid Echahed. (Google Earth, 2019)	33
Photo 10: Causse d'Imouzzet au Moyen Atlas. (1 Avr. 2015)	40
Photo 11: Le Dir d'Imouzzet Kander.....	40
Photo 12: Plateau de Saïss. (1 avr. 2015)	41
Photo 13: Rides prérfaines. (20 Sep. 2015)	41
Photo 14: Oued Chekkou au niveau du Moyen Atlas. (15 sept. 2016)	52
Photo 15: Exutoire oued El Himmer (avant la confluence oued Fès). (18 mai 2015)	52
Photo 16: Oued El Mehraz. (Quartier Mont fleuri). (24 mai 2015).....	53
Photo 17: Oued Boufekrane (Aval l'entrée de la médina de Fès). (5sep. 2014(.....	53
Photo 18: Photo aérienne (2005) de l'oued El Malleh au nord de la Médina	53
Photo 19: Oued Bourkaiz (29 nov. 2017)	53
Photo 20: Photo aérienne (2005) de l'oued Atchane au niveau du plateau de Saïss	55
Photo 21: Oued N'Ja (15 sept. 2016).....	55
Photo 22: Oued Ain Taoujdate.	55
Photo 23: Oued Ain Souir avant la confluence oued Mikkès. (20 sept. 2015)	55
Photo 24: Oued Tizguit à l'amont (25Sept. 2016).....	55
Photo 25: Oued Jedida à l'entrée du plateau de Saïss. (12 avr. 2015).....	55
Photo 26: Oued Sbaa Ayoun (20 sept. 2015).....	56
Photo 27: Oued Mikkès Aval. (20 sept. 2015)	56
Photo 28: Le tissu urbain à la partie aval de l'oued Fès	66
Photo 29: Couverte végétale (Causse d'Ifrane). (20 sept. 2015)	66
Photo 30: Arboriculture dense (Zone de Douyet, 2 fév. 2018)	66
Photo 31: Culture irriguée au périmètre de la ville de Fès (6 avr. 2015)	66
Photo 32: Segua de Bittit. (12 avril 2015).....	67
Photo 33: jaugeage capacitif aux sources Ain Chkef. (27 Juin 2014)	120
Photo 34: Jaugeage capacitif dans la source d'Aïn Smen. (27Juin 2014).....	120
Photo 35: Déversoir à paroi mince, source Ribaa Amont. (29 fév. 2016).....	121
Photo 36: Déversoir à paroi mince, source Ain Sultane. (12 Avril. 2015).	121
Photo 37: Jaugeage par dilution. (https://www.iowater.org/).....	121
Photo 38: Station de mesure ultrasonique à Ain Bittit (25 mai 2016).	123
Photo 39: Mesure de débit par l'ADCP. (https://www.adcpro.fr/)	124
Photo 40: Moulinet utilisé pour mesurer de débit	124
Photo 41: Exploration du champ des vitesses dans une section naturelle, source Ribaa aval. (29 fév., 2016).....	129

Photo 42: Exploration du champ des vitesses dans une section canalisée, source de Bittit. (12 avril. 2015).....	129
Photo 43: Exploration du champ des vitesses, source Ghara. (25 fév. 2018).....	130
Photo 44: Exploration du champ des vitesses, Source Ribaa. (12 avril 2015).....	130
Photo 45: Exploration du champ des vitesses dans l'amont de l'oued Fès. (12 Sept. 2014).....	130
Photo 46: Exploration du champ des vitesses dans l'amont de l'oued Fès. (5 sep. 2014)	130
Photo 47: Première point de jaugeage à l'amont de l'oued Chkou (Oued El Quantra). (Sept. 2016)	136
Photo 48: Calcaire dominant au niveau de l'amont de l'Oued Chkou. (Sept. 2016).....	136
Photo 49: situation de l'oued Chkou au niveau d'Imouzzer Kenddar. (Sep. 2016).....	137
Photo 50: situation de l'oued Chkou au niveau de dir. (12 avril. 2015).....	137
Photo 51: Photo de la Seguia d'Ain Sultane. (12 avril 2015).....	137
Photo 52: Source Ain Sultane. (12 avril 2015).....	137
Photo 53: Oued Ain Chkef au niveau du forêt Ain Chkef. (11 Avr 2015)	139
Photo 54: Oued Ain Smen au niveau du quartier Zouagha de Fès. (7 Sep. 2014)	139
Photo 55: Oued Ain Chkef à l'aval. (8 Sep. 2015).....	139
Photo 56: Présence d'une végétation dense (oued Fès amont). (20 Sept. 2015).....	139
Photo 57: Station d'épuration des eaux au niveau de la médina de Fès. (15 Janv. 2020).....	142
Photo 58: Station d'épuration des eaux usées de Fès STEP. (Www.radeef.ma)	142
Photo 59: Oued Fès au niveau du pont Marjane. (6 Avr 2015)	142
Photo 60: Oued Fès au niveau du Quartier Ain Nokbi. (6 Avr 2015)	142
Photo 61: situation de l'oued Tizguit au niveau de l'amont (Otl1). (Sep. 2016).....	144
Photo 62: Oued Tizguit au niveau d'amont. (Sep. 2016)	144
Photo 63: Oued Tizguit au niveau d'Ain vital. (Sep. 2016)	144
Photo 64: Assèchement de l'oued Tizguit au niveau du dir (Avril 2016)	144
Photo 65: Dérivation des eaux de la source de Bittit vers une seguia. (25 mai 2016).....	145
Photo 66: Dérivation des eaux de la source d'Ain Atrous vers une seguia (29 Fév. 2016)	145
Photo 67: Dérivation des eaux de la source d'Ain Akkous vers une seguia (25 mai 2016).....	145
Photo 68: Dérivation des eaux de la source El Rhara vers une seguia. (8 Sep. 2016).....	145
Photo 69: Oued Aïn Chkef en avril 2015	151
Photo 70: L'aval de l'oued Fès en avril 2015.....	151
Photo 71: Affleurement de la nappe phréatique de Saïss au niveau de la vallée de l'oued Fès. (Cliché de LASRI M., Mars 2010)	168
Photo 72: Ribaa Amont (29 février 2016)	184
Photo 73: Ribaa Aval (29 février 2016).....	184
Photo 74: Situation de la source d'Aguemguem en hautes eaux (25 Mai 2016).....	185
Photo 75: Situation de la source d'Aguemguem en basses eaux (8 Sept 2016)	185
Photo 76: Source de Bittit (29 février 2016)	186
Photo 77: Source de Bittit (28 Juin 2014).....	186
Photo 78: Source Ain Cheggag (28 juin 2014)	187
Photo 79: Source Boukhnafer (29 Nov. 2017).....	187
Photo 80:Source Rhara (25 février 2018).....	189
Photo 81: Source Amellal (captée dans un canal) (25 février 2018).....	189
Photo 82: Source Bittit en situation normale (29/02/2016)	196
Photo 83: Source de Bittit en turbidité	196
Photo 84: Source Ribaa en situation normale (29/02/2016)	196

Photo 85: Source de Ribaa en turbidité (12/04/2015).....	196
Photo 86: Irrigation localisée au niveau d'Ain Taoujdate (25/02/2018).....	200
Photo 87: Irrigation par système gravitaire à la zone de Bittit (cliché : Castel A, 2014).....	200
Photo 88: canal suspendu captant la source de Bittit (14/05/2016).....	200
Photo 89: Seguia de la source d'Amellal (25/02/2018).....	200
Photo 90: : Seguia d'Ain d'Ablouz (25/02/2018).....	200
Photo 91: Seguia de la source d'El Rhara (08/09/2016)	200
Photo 92: Place R'Cif à l'entrée de la médina	206
Photo 93: Jardins de Jnan Sbil	206
Photo 94: El Marja à l'oued Fès amont	206
Photo 95: Foret Ain Chkef (2015).....	207
Photo 96: Barrage El Gaada sur l'oued Boufkrane (2015).....	207
Photo 97: Oued Fès au niveau de Bab Jdid	209
Photo 98: Oued Bouragrag à Rabat.....	209
Photo 99: Oued Fès au niveau de Jen Chfour	209
Photo 100: Oued Sebou à Kénitra	209
Photo 101: Oued Fès après la place de R'Cif.....	209
Photo 102: Oued Fès à la place de R'Cif	209
Photo 103: Oued Ain Smen à Fès	209
Photo 104: Oued Oum Rabia à Azemmour	209

TABLE DE MATIERES :

SOMMAIRE.....	1
RESUME.....	2
ABSTRACT.....	3
RESUME (arabe)	4
REMERCIEMENTS.....	5
INTRODUCTION GENERALE.....	6
La zone d'étude : deux bassins versants limitrophes au centre de Sebou.....	7
Objectifs de la thèse.....	10
Problématique.....	11
Méthodes adoptées et démarche suivie.....	12
Structure et contenu de la thèse.....	14

CHAPITRE I :

PALEOGEOGRAPHIE ET CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES	19
2. GEOLOGIE DES DEUX BASSINS : TROIS UNITES STRUCTURALES.....	20
2.1 CAUSSES DU MOYEN ATLAS.....	22
2.2 PLATEAU DE SAÏS.....	22
2.2.1 Plateau de Saïss Fès	23
2.2.2 Plateau d'Aïn Taoujdade.....	24
2.3 RIDES DU PRERIF	24
3. RECONSTITUTION DES EVENEMENTS PALEOGEOGRAPHIQUES : DU TORTONNIEN A L'ACTUEL	24
4. UNE LITHOLOGIE DIVERSIFIEE CONTROLANT L'INFILTRATION DANS LES DEUX BASSINS VERSANTS.....	27
5. PRESENTATION DES BV OUEDS FES ET OUED MIKKES ET LEURS SOUS-BASSINS VERSANTS.....	32
6. ANALYSE MORPHOMETRIQUE DES BASSINS VERSANTS.....	37
6.1 INDICE DE COMPACITE DE GRAVELIUS	37
6.2 LA LONGUEUR ET LA LARGEUR DU RECTANGLE EQUIVALENT (L) (l) DES BASSINS VERSANTS.....	38
7. TOPOGRAPHIE ET ENERGIE DE RELIEF DES BASSINS VERSANTS.....	39
7.1 HYPSONOMETRIQUE DES BASSINS VERSANTS	41
7.2 LES COURBES HYPSONOMETRIQUES DES BASSINS VERSANTS	41

7.3	LES ALTITUDES CARACTERISTIQUES ET L'ÉNERGIE DU RELIEF DES BASSINS	45
7.4	LE SYSTEME DE PENTES DANS LES DEUX BASSINS VERSANTS	48
8.	LES CARACTERISTIQUES HYDROMORPHOMETRIQUES DES BVS DES OUEDS FES ET MIKKES.....	50
8.1	PRESENTATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE DES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES	50
8.2	DENSITE DE DRAINAGE	56
8.3	L'ORGANISATION ET LA HIERARCHISATION DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE	57
8.4	PROFILS LONGITUDINAUX DES OUEDS FES ET MIKKES.....	59
8.5	TEMPS DE CONCENTRATION DES ECOULEMENTS	62
9.	OCCUPATION DU SOL ET PERMEABILITE DES TERRAINS	64
CONCLUSION DU CHAPITRE		

CHAPITRE II :

CONTRASTES SPATIO-TEMPORELLES DES FACTEURS CLIMATIQUES ET LEURS INFLUENCES SUR LE BILAN HYDRIQUE

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1.	CONTEXTE DU RESEAU DES STATIONS ET POSTES D'OBSERVATIONS CLIMATIQUES	72
2.	CRITIQUE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES : HOMOGENEISATION ET COMPLEMENTS DES LACUNES .	74
2.1	COMPLEMENT DES LACUNES VIA LE MODELE VECTEUR REGIONAL (MVR)	75
2.2	QUALITE DES DONNEES ET COEFFICIENT DE CORRELATION VIA LE VECTEUR REGIONAL	76
2.3	TEST D'HOMOGENEISATION DES DONNEES DES STATIONS OBSERVEES	78
2.4	METHODE DES SIMPLES CUMULS.....	78
2.4.1	<i>Méthode des doubles cumuls</i>	80
3.	VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS	81
3.1	LA VARIABILITE ANNUELLE DES APPORTS PLUVIOMETRIQUES	81
3.2	LA VARIABILITE MENSUELLE DES APPORTS PLUVIOMETRIQUES	84
3.3	LA REPARTITION SAISONNIERE	86
4.	ANALYSE DES TENDANCES DES PRECIPITATIONS.....	90
4.1	MISE EN ROUTE CUSUM.....	90
4.1.1	<i>CUSUM de Fès Saïss et Sefrou</i>	91
5.	ANALYSE FREQUENTIELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES	93
6.	RELATIONS ENTRE LES PRECIPITATIONS MOYENNES ANNUELLES ET LA TOPOGRAPHIE	95
7.	LE CONTRASTE SPATIO-TEMPOREL DES TEMPERATURES	97
7.1	VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES TEMPERATURES MOYENNES ANNUELLES.....	98
7.2	VARIATION MENSUELLE ET SAISONNIERE DE LA TEMPERATURE.....	101
8.	LES INDICES D'ARIDITE DANS LES DEUX BASSINS ETUDIES	103
8.1	INDICE D'ARIDITE DE E. DE MARTONNE	103
8.2	LE QUOTIENT OMBROTHERMIQUE D'EMBERGER.....	105
9.	EVAPOTRANSPIRATION	106
9.1	CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP) VIA LA METHODE DE THORNTHWAITE.....	107
9.2	CALCUL DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE (ETR) VIA LES METHODES DE THORNTHWAITE ET TURC.....	110
CONCLUSION DU CHAPITRE		

CHAPITRE III :

QUANTIFICATION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE : METHODES ET TECHNIQUES DE MESURES ET SPATIALISATION

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. QUELLE APPROCHE POUR COMPRENDRE L'HYDROLOGIE DE SURFACE DES DEUX BASSINS ETUDIES ?	117
2. METHODES ET TYPES DE MESURES DES DEBITS	119
2.1 LES METHODES GLOBALES	120
2.1.1 Méthode volumétrique (capacitive)	120
2.1.2 Seuils-jaugeurs	120
2.1.3 Dilution chimique	121
2.1.4 Méthode électromagnétique	122
2.2 METHODE ULTRASONIQUE	122
2.3 METHODES COMPLETES	123
2.3.1 Jaugeage par ADCP	123
2.3.2 Moulinet hydrométrique	124
3. METHODE DE JAUGEAGE ADOPTÉE : EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES	125
4. PROCEDE DE L'ACQUISITION DES DONNEES HYDROMETRIQUES VIA LA METHODE « EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES »	127
4.1 PREPARATION DE LA FEUILLE DE JAUGEAGE ET OPERATIONS DE TERRAIN	127
4.2 CHOIX DE LA SECTION DE JAUGEAGE	127
4.3 MESURE ET EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES DANS UN SITE	129
4.4 DEPOUILLEMENT DES JAUGEAGES	130
5. DELIMITATION ET CODIFICATION DES POINTS DE MESURES DANS LES DEUX BASSINS ETUDIES	131
6. QUANTIFICATION DES ECOULEMENTS DE SURFACE DANS LES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES	134
7. L'ETUDE DE LA VARIATION SPATIOTEMPORELLE DES ECOULEMENTS DE L'AMONT VERS L'AVAL VIA LES PROFILS HYDROLOGIQUES	134
7.1 PROFILS HYDROLOGIQUES DE L'OUED FES ET SES AFFLUENTS	135
7.1.1 La partie amont	136
7.1.2 Un assèchement total au niveau du dir	136
7.1.3 Retour des écoulements à partir des sources du Saïss puis l'agglomération de Fès	137
7.1.4 Une éventualité de débit au niveau d'exutoire de l'oud Fès	141
7.2 PROFILS HYDROLOGIQUES DE L'OUED MIKKES ET SES AFFLUENTS	142
7.2.1 Partie amont très influencée par sa géologie	143
7.2.2 Au niveau du plateau de Saïss	145
7.2.3 La zone de confluence à l'entrée du barrage Sid Echahed	146
8. SPATIALISATION DES RENDEMENTS HYDROLOGIQUES : CARTOGRAPHIE DES DEBITS SPECIFIQUE	147
8.1 RENDEMENT HYDROLOGIQUE EN PERIODES DES ETIAGES	148
8.2 RENDEMENT HYDROLOGIQUE EN PERIODES DES HAUTES EAUX	150
CONCLUSION DU CHAPITRE	

CHAPITRE IV :

POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE : COMPORTEMENT, VARIATIONS, EXPLOITATION ET PERCEPTION

INTRODUCTION DU CHAPITRE

1. PRESENTATION DU POTENTIEL HYDROGEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	157
2. TROIS NAPPES HYDROGEOLOGIQUES INFLUENCENT L'HYDROSYSTEME DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIES	158
2.1 LA NAPPE DU CAUSSE D'EL HAJEB-IFRANE.....	160
2.2 LA NAPPE PROFONDE DU LIAS AU NIVEAU DU PLATEAU DE SAÏSS	161
2.3 NAPPE PHREATIQUE LIBRE DU PLIO-QUATERNAIRE DU SAÏSS	161
3. FLUCTUATION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE : INFLUENCE DES APPORTS PLUVIOMETRIQUES SUR LA NAPPE PHREATIQUE DE SAÏSS	162
3.1 EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE DE LA NAPPE DE SAÏSS.....	164
3.2 ANALYSE DE LA RELATION ENTRE LE NIVEAU PIEZOMETRIQUE AVEC LES APPORTS PLUVIOMETRIQUES	166
4. CARTOGRAPHIE DES ZONES POTENTIELLES POUR LE STOCKAGE DES EAUX SOUTERRAINES	170
4.1 METHODOLOGIE.....	170
4.2 RESULTATS	171
5. PRESENTATION DES SOURCES LOCALISEES DANS LES BASSINS VERSANTS DES OUEDS FES ET MIKKES. 173	
6. HISTORIQUE DES MESURES DE DEBITS ET ETUDES DES SOURCES DANS LA ZONE D'ETUDE	176
7. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE DES PRINCIPALES SOURCES DE LA ZONE D'ETUDE.....	177
8. COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DES SOURCES DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIES	180
8.1 LES SOURCES DES CAUSSES : UN COMPORTEMENT HYDROLOGIQUE DE TYPE KARSTIQUE	181
8.2 LES SOURCES DU PIEMONT : UN REGIME HYDROLOGIQUE COMPLEXE	182
8.3 SOURCES DU PLATEAU DE SAÏSS : DE L'ABONDANCE A L'INDIGENCE	186
9. RELATION PLUIE-DEBIT DES SOURCES DES DEUX BASSINS VERSANTS ETUDIE	190
10. PHENOMENE DE TURBIDITE DES EAUX DES SOURCES	195
11. EXPLOITATION DES RESSOURCES EN EAU	197
11.1 EAU D'IRRIGATION : UNE RESSOURCE DE PLUS EN PLUS SOLLICITEE	197
11.2 EAU POTABLE : PLUSIEURS COMPLEXES D'ALIMENTATION POUR LES CENTRES URBAINS ET RURAUX	202
12. PERCEPTION DES RIVERAINS ET VISITEURS VIS-A-VIS DU PAYSAGE HYDRAULIQUE DES OUEDS TRAVERSANT LA VILLE DE FES	203
12.1 CADRE GENERAL ET CARACTERISTIQUES DU QUESTIONNAIRE	203
12.2 DEROULEMENT ET REMPLISSAGE DES QUESTIONNAIRES	205
12.3 RESULTATS DE L'ENQUETE	207
CONCLUSION DU CHAPITRE	
CONCLUSION GENERALE.....	213
BIBLIOGRAPHIE.....	217

ANNEXE.....	232
LISTE DES FIGURES.....	255
LISTE DES TABLEAUX.....	260
LISTE DES PHOTOS.....	262
TABLE DE MATIERE.....	265