

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

-جامعة الجيلالي بونعامة – خميس مليانة

UNIVERSITE DJILALI BOUNAAMA– KHEMIS-MILIANA



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre

Département : Sciences de la Terre

Spécialité : Hydrogéologie

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention de diplôme de Master

Thème

**Impact du Changement Climatique sur l'Évolution des Eaux Souterraine
dans la plaine alluviale du Haut Chélif**

Préparé par:

- LARBI BOUAMRANE Faiza
- NABI Oum El Khir

Devant le jury :

Promoteur	BOUCEFIANE Abdelkader	MCB
Président	SADEUK BEN ABBAS Abdelkader	MCB
Examineur	RAMDANE Saïd	MAA
Examineur	ZEDAM Miloud	MAA

Année universitaire : 2018/2019

Résumé

La région de Haut Cheliff a connue une diminution pluviométrique annuelle au cours des trois dernières décennies. Cette variabilité s'est particulièrement accentuée à partir des années quatre-vingt et a eu des impacts négatifs importants sur les ressources en eaux souterraine, ainsi que sur le cycle des précipitations.

L'objectif de cette étude vise à mettre en exergue l'existence du changement climatique, manifestée principalement par une variabilité dans la quantité des précipitations et leurs irrégularités dans le temps et dans l'espace ainsi que leurs effets sur la fluctuation des niveaux piézométriques et par conséquent son impact sur l'alimentation des réserves d'eaux souterraines de la nappe alluviale du Haut Cheliff. Pour atteindre cet objectif, diverses données (pluviométrie et piézométrie) ont été utilisées, et différentes méthodes (indice de précipitation standardisé (SPI), moyenne mobile, test d'homogénéité, la statistique Buishand, test de Pettit, méthode bayésienne de Lee Heghnian et procédure de segmentation d'Hubert) ont été employées.

Les résultats obtenues à travers cette étude ont indiqué l'existence d'une rupture de stationnarité à la fin des années soixante dix et au début des années quatre vingt, manifestée généralement par des fluctuations des régimes pluviométriques. Les symptômes de cette variabilité climatique se répercutent sur les ressources en eau souterraine. Une baisse continue dans l'ensemble des piézomètres étudiée. Cette diminution est principalement due à l'affaiblissement des précipitations et à l'augmentation du nombre de points d'eau et la surexploitation de ces nappes.

Mots clés : Changement climatique, précipitation, température, rupture de stationnarité, moyenne mobile, SPI, niveau piézométrique, eaux souterraine, Haut Chélif.

ملخص

شهدت منطقة شلف الأعلى تباينًا في انخفاض هطول الأمطار على مدار العقود الثلاثة الماضية. حيث برز هذا التباين بشكل خاص في الثمانينات من القرن الماضي وكان له آثار سلبية كبيرة على موارد المياه الجوفية، وكذلك على دورة هطول الأمطار.

الهدف من هذه الدراسة هو تسليط الضوء على وجود تغير المناخ، والذي يتجلى أساسا في تقلب كمية الامطار وعدم انتظامها في المكان والزمان وتأثيرها على تقلب >، وبالتالي تأثيرها على احتياط المياه الجوفية لحوض شلف الأعلى. لتحقيق هذا الهدف استعملنا العديد من المعطيات (كميات تساقط الامطار ومستوى المياه الجوفية) واستخدمنا طرق مختلفة (مؤشر هطول الأمطار القياسي، اختبارات احصائية لتحديد سنوات الانقطاع في مستوى هطول الامطار واختبار التجانس....)

أشارت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال هذه الدراسة إلى وجود انقطاع وعدم ثبات المناخ في أواخر السبعينات وأوائل الثمانينات، تجلى بشكل عام في تقلبات في تساقط الأمطار، حيث انعكست أعراض هذا التغير المناخي في انخفاض مستوى موارد المياه الجوفية. ويعود هذا الانخفاض بشكل رئيسي إلى ضعف هطول الأمطار وزيادة عدد الأبار والإفراط في استغلال هذه المياه.

الكلمات المفتاحية ، التغير المناخي، المياه الجوفية، الامطار، درجة الحرارة، تغيرات الهطول، مؤشر هطول الامطار، شلف الاعلى.

Abstract

The Upper-Cheliff area has experienced a decrease in annual rainfall over the last three decades. This variability has particularly increased since the 1980s and has had significant negative impacts on groundwater resources as well as on the precipitation cycle.

The objective of this study is to highlight the existence of climate change, manifested mainly by the variability in the amount of precipitation and their irregularities in time and space and their effects on the fluctuation of piezometric level and consequently its impact on the supply of under-groundwater reserves of the Upper-Cheliff alluvial aquifer. To achieve this objective, various data (rainfall and piezometric data) were used, and different methods (standardized precipitation index (SPI), moving average, homogeneity test, Buishand statistic, Pettit-test, Lee-Heghnian Bayesian method and Hubert's segmentation procedure) were employed.

The obtained results through this study indicated the existence of a break in stationarity in the late seventies and early eighties, generally manifested by fluctuations in rainfall patterns. The symptoms of this climatic variability are reflected in groundwater resources. A continuous decline in all the piezometers studied. This decrease is mainly due to the weakening of rainfall and the increase in the number of water points and the overexploitation of these water tables.

Key words: Climate change, precipitation, temperature, stationarity break, moving average, SPI, piezometric level, groundwater, Upper-Cheliff.

Sommaire

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>ملخص</i>	<i>ii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iii</i>
Introduction generale	1
I. Aperçu bibliographique	- 2 -
I.1 Climat.....	- 2 -
I.2 Changements climatiques.....	- 2 -
I.2.1 Les causes du changement climatique.....	- 3 -
I.3 Les indicateurs du changement climatique.....	- 4 -
I.3.1 À l'échelle globale.....	- 4 -
I.3.2 A l'échelle régionale (l'Algérie).....	- 5 -
I.4 Impacts sur la ressource en eau.....	- 5 -
I.4.1 Impact du changement climatique sur les eaux de surface.....	- 5 -
I.4.2 Impact du changement climatique sur les eaux souterraines..	- 6 -
I.5 Les études qui ont été fait dans le bassin méditerranéen.....	- 8 -
II. Présentation de la zone d'étude	10
II.1 Situation géographique.....	10
II.2 Caractéristiques morphologiques du bassin versant.....	11
II.3 Réseau hydrographique.....	12
II.4 Aspect hydroclimatique du bassin versant du Haut Cheliff.....	13
II.4.1 Les précipitations.....	14
II.4.2 Les températures.....	16
II.4.3 Diagramme de Gaussen.....	18
II.4.4 Évaporation.....	19
II.5 Contexte géologique.....	20
II.5.1 Stratigraphie.....	21
II.6 Contexte hydrogéologique.....	25
II.6.1 Les calcaires Jurassiques.....	25
II.6.2 Les aquifères du Miocène.....	25

II.6.3	Les aquifères du Pliocène.....	25
II.6.4	Les aquifères alluvionnaires du Quaternaire.....	25
III.	Matériels et méthodes de travail.....	27
III.1	Données utilisées.....	27
III.1.1	Réseau de mesure pluviométrique de la région d'étude.....	27
III.1.2	Réseau de mesures piézométriques de la région d'étude.....	29
III.2	Méthodes de travail.....	30
III.2.1	Analyse des tendances dans les séries chronologiques.....	30
III.2.2	Détection de la rupture au sein des série pluviométrique.....	31
III.2.3	Analyse de rupture au sein des séries pluviométriques.....	31
III.2.4	Indices climatiques.....	34
III.2.5	Interpolation piézométrique à l'aide de la géostatistique.....	35
III.2.6	Établissement des profils des cotes piézométrique.....	36
IV.	Résultats et discussion.....	37
IV.1	Analyse des tendances dans les paramètres climatique.....	37
IV.1.1	Analyse des tendances de température.....	37
IV.1.2	Évolution des tendances dans les séries des précipitations.....	38
IV.2	Évolution et tendance du niveau de la profondeur de la nappe.....	46
IV.2.1	Analyse exploratoire des données piézométriques.....	46
IV.2.2	Évolution spatio-temporelle des niveaux piézométriques.....	47
	Conclusion générale.....	55
	Références bibliographiques.....	58
	Annexes.....	61

Liste des Tableaux

Tableau II-1 : Paramètres de forme des sous bassins versants du haut Chélif.....	11
Tableau II-2 : Variation de températures moyennes mensuelles.	17
Tableau II-3 : Les valeurs de température (°C) et de pluviométrie (mm).....	18
Tableau III-1 : Caractéristiques des stations pluviométriques.	28
Tableau III-2 : Classes de l'indice standardisé des précipitations (SPI) (McKee et al. 1993). 35	
Tableau IV-1 : Caractéristiques statistiques des séries pluviométriques.	39
Tableau IV-2 : Résultats de test de rupture et déficits pluviométrique.....	44

Liste des Figures

Figure II-1 : Localisation de la zone d'étude.	10
Figure II-2 : Carte des sous bassins du Haut Chélif.....	11
Figure II-3 : Carte de répartition des altitudes de la zone d'étude.	12
Figure II-4 : Réseau hydrographique du bassin du Haut Cheliff.	13
Figure II-5 : Extrait de la carte des étages bioclimatique du Nord d'Algérie.	14
Figure II-6 : Extrait de la carte des précipitations moyenne annuelle.....	15
Figure II-7 : Évolution des précipitations annuelles (1968-2017).	15
Figure II-8 : Précipitations moyennes mensuelles (1968-2017).	16
Figure II-9 : Température moyenne annuelle (Harreza, 1988-2018).....	16
Figure II-10 : Variation des températures moyenne mensuelle (C°).	17
Figure II-11 : Diagrammes Ombrothermiques (stations de Khemis, Harezza et Ain Defla)...	19
Figure II-12: Évaporation moyenne mensuelle (Période 1986-2017).....	20
Figure II-13: Évaporation moyenne annuelle (Période 1986-2017)	20
Figure II-14 : Carte Géologique du Haut Cheliff.	21
Figure II-15 : Coupe géologique dans le bassin Cheliff dans la direction Nord-Sud.	24
Figure III-1 : Localisation des stations pluviométriques utilisées.....	27
Figure III-2 : Disponibilité en données pluviométriques.	28
Figure III-3 : Carte de localisation des piézomètres du bassin du Haut Chélif.	29
Figure III-4 : Disponibilité en observation des cotes piézométrique.	30
Figure III-5 : Analyse géostatistique des données piézométriques sous <i>ArcGis</i>	36
Figure IV-1 : Évolution des tendances temporelles des températures (a) – Max, (b)- Min et (c)- Moyennes, (Station de Harreza 1988-2018).....	38
Figure IV-2 : Représentation en box plot de séries pluviométriques.	40
Figure IV-3 : Variation annuelle de précipitation (mm) au cours de la période (1968-2017). 41	
Figure IV-4 : Exemple de l'ellipse de contrôle du test de Buishand (Station 011507).....	42
Figure IV-5 : Résultat de la détection de rupture dans les séries pluviométriques.	43
Figure IV-6 : Évolution de l'indice pluviométrique standardisé (SPI-12 Mois, 1968-2017).. 45	
Figure IV-7 : Carte piézométrique des Hautes eaux pour la compagne Avril 2002.	48
Figure IV-8 : Carte piézométrique des Hautes eaux pour la compagne Avril 2005.	48
Figure IV-9 : Carte piézométrique des Hautes eaux pour la compagne de Mai 2015	49
Figure IV-10 : Carte piézométrique des Basses eaux (Compagne de septembre 2003).	50

Figure IV-11 : Carte piézométrique des Basses eaux (Compagne de septembre 2005)	50
Figure IV-12 : Carte piézométrique des Basses eaux (Compagne de septembre 2015).	51
Figure IV-13 : Tracé des profiles piézométriques.....	52
Figure IV-14 : Profiles piézométriques ((a)-hautes eaux et (b)- Basses eaux)	52
Figure IV-15 : Évolution des tendances dans les niveaux piézométriques	53
Figure IV-16 : Évolution des niveaux piézométriques des basses eaux	54

Liste des symboles et Acronyme

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques.

ANRH : Agence National des ressources en hydraulique.

GIEC : le groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat.

OMM : L'Organisation météorologique mondiale.

GES : Gaz à effet de serre.

SPI : Standardized précipitation index (L'indice de précipitations standardisé).

P_i : Précipitation de l'année i

P_m: Précipitation moyenne

σ : Écartype

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction generale

La variabilité climatique est un phénomène dont les causes sont difficiles à déterminer, peut se manifester par les épisodes récurrents de la sécheresse, la désertification, la rareté des eaux et changement de leur chimisme, et l'érosion des sols ainsi que leur salinisation. Cette variabilité peut avoir des effets sur les ressources naturelles telles que les eaux souterraines.

En Algérie, la demande en eau et la sécheresse associées ont causé une diminution de quantité et la qualité des eaux souterraines. La pénurie de ressources hydriques superficielles a entraîné, pendant les dernières années, une exploitation intensive des nappes souterraines surtout à usage agricole, ce qui a produit de fortes baisses de niveaux phréatiques.

Des nombreuses études ont été élaborées dans le but d'obtenir plus d'information sur le changement et la variabilité climatique, ainsi de connaître l'influence et les impacts de ces changements sur les différents ressources en eau superficielle et souterraines.

L'objectif de cette étude est de mettre l'accent sur l'évolution de la variabilité et le changement climatique et leur impact sur la variation du niveau piézométrique de la nappe d'eau souterraine au cours de ces dernières années.

Ce travail, composé de quatre parties, sera particulièrement axé sur les approches suivantes :

- La première partie s'agit d'une synthèse bibliographique concernant les notions du climat, changement climatique et les causes de l'évolution du climat. Ainsi, les impacts de ce changement sur les ressources en eau. Enfin, un résumé sur les études qui ont été fait dans le bassin méditerranéen.
- La deuxième partie est réservé à la présentation de la zone d'étude et la problématique liée à la disponibilité et la qualité des données.
- Dans la troisième partie nous définissons les méthodes statiques utilisées pour la détection de rupture aux seins des séries pluviométrique. Enfin, nous allons définir les indices climatiques et son rôle pour suivre l'évolution du climat.
- La dernière partie consiste à faire une application de ces méthodes sur la zone d'étude et interpréter les résultats obtenus.

Chapitre I :

APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE

I. Aperçu bibliographique

I.1 Climat

Le mot climat apparaît en français au XIII^e siècle, dérivant du latin cliamtis. Pourtant son origine est grecque : le Klimt est l'inclinaison d'un point de la Terre au Soleil. Cette notion ce « klimat » y est très éloignée du concept moderne de climat (**Tabeaud, 2008**). En 1910, Hann a défini le climat comme étant « l'ensemble des éléments métrologique qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère au-dessus d'un lieu (**Helga-Jane et Isabelle, 2010**). Ainsi au cours de l'année 1987 Gibbs a proposé une définition plus dynamique « la probabilité d'occurrence de divers états de l'atmosphère dans un lieu ou une région, au cours d'une certaine période donnée. » (**Christian, 2002**). Autrement dit le climat correspond à la distribution statistique des conditions atmosphériques dans une région donnée pendant une période donnée. Il est effectué à l'aide de valeurs moyennes établies à partir de mesures statistiques, mensuelles et annuelles, ainsi que sur la base des données atmosphériques locales: température, précipitations, ensoleillement, humidité, vitesse du vent (**Baghdadli, 2014**).

Sur la surface du globe, on distingue différents types de climats. Allant des plus chauds (climats subtropicaux) aux plus froids (climats polaires).

Entre ces deux extrêmes, il existe une multitude de nuances, influencées d'abord par la position des latitudes (appelées également parallèles) et donc l'inclinaison par rapport au soleil, mais aussi par différents facteurs tels que le relief, la proximité de la mer, la circulation atmosphérique, etc.

I.2 Changements climatiques

Le changement climatique est «un état altéré du climat qui peut être identifié par le changement dans la moyenne et / ou de la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, généralement pendant des décennies ou plus». Elle peut être due à «des processus internes naturels ou des forçage externes, ou à des changements anthropiques persistants de la composition de l'atmosphère ou dans l'occupation des sols» (**GIEC, 2007**).

On notera que la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), dans son Article 1, définit les « changements climatiques » comme étant des «changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes comparables. » (. La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les « changements climatiques » qui peuvent être

attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la « variabilité climatique » due à des causes naturelles (**Yidourega, 2009**).

I.2.1 Les causes du changement climatique

I.2.1.1 Les causes naturelles

1) L'effet de serre

C'est un phénomène naturel résultant de la réémission, sous forme d'un rayonnement thermique infrarouge, d'une partie du rayonnement solaire incident, par la surface terrestre. L'autre partie est absorbée par l'atmosphère ou par la surface de la Terre et donc transformés en chaleur.

Les gaz à effet de serre, que sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitrique, piègent ce rayonnement thermique dans l'atmosphère terrestre et augmentent ainsi la température au sol.

Si l'un des éléments régissant le système climatique subit des modifications considérables, l'équilibre peut être rompu, ce qui entraînerait un changement climatique planétaire qu'il soit temporaire ou permanent (**SAIDA, 2007**).

2) L'activité solaire

Le soleil traverse des périodes de grande activité, qui se traduisent par une augmentation du nombre de taches solaires, ainsi que par un accroissement du rayonnement, de l'activité magnétique et des flux de particules de haute énergie. Ces fluctuations de l'activité solaire s'effectuent à des échelles de temps qui peuvent varier de plusieurs millions d'années à quelques minutes (**TABET, 2008**).

Lorsque le nombre de taches solaires est important, le soleil émet plus d'énergie (la terre en reçoit plus), par conséquent un changement de température et du climat à lieu (**Lean, 1995; Hyot, 1998; Fröhlich, 2000**).

3) Les activités volcaniques

Plusieurs études ont montré que l'activité volcanique est un autre moteur de la variabilité climatique (**Budyko, 1984; Baroni, 2006**). Les grandes quantités de particules et de gaz émis dans l'atmosphère suite aux éruptions empêchent le rayonnement solaire de passer. Toute fluctuation de ce rayonnement a une incidence sur le climat, en particulier sur la température (**Anonyme, 2014**).

Le volcanisme implique une chute des températures à court terme, mais s'avère être un puissant facteur de réchauffement sur le long terme. Les éruptions volcaniques sont parfois si violentes que de grandes quantités de poussière et de gaz sont projetées à haute altitude dans l'atmosphère. Les particules qui atteignent la stratosphère peuvent persister plusieurs années. Elles provoquent une baisse des températures en réfléchissant le rayonnement solaire (**Jacques et al., 2006**).

4) Les causes anthropiques

Le changement climatique d'origine anthropique est principalement dû à la production et au rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère du fait de l'activité humaine. Cette augmentation des gaz à effet de serre (GES) est directement liée à la croissance industrielle et aux modes de production et de consommation qui y sont associés (**Anonyme, 2014**).

En effet, depuis le début de l'ère industrielle, les émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols perturbent significativement le bilan radiatif de l'atmosphère. On observe un accroissement sensible des concentrations atmosphériques en gaz carbonique, en méthane et en oxyde nitreux ; le taux de CO₂ est passé de 280 ppm à près de 400 ppm en 2013. Ces variations dépassent largement celles observées au cours des 400000 dernières années, lorsque les cycles biogéochimiques ne subissaient que des variations naturelles (**Jacques et al., 2006**).

I.3 Les indicateurs du changement climatique

I.3.1 À l'échelle globale

Selon le 4^{ème} rapport du GIEC publié en 2007, les changements climatiques observés à l'échelle globale peuvent être résumés en :

- L'augmentation de la température moyenne à la surface de la terre. Selon le même rapport la nouvelle valeur de la vitesse moyenne du réchauffement au cours des cents dernières années (1906-2005) de 0,74 (0,56 à 0,92) °C est donc plus grande que n'était la valeur analogue calculée au moment du troisième Rapport de 0,6 (0,4 à 0,8) °C pour la période 1901-2000.
- L'augmentation du niveau de la mer d'environ 17cm au cours du dernier siècle.
- Une diminution dans la masse des calottes de glace du Groenland et de l'Antarctique.
- Modification de la fréquence des événements extrêmes.

I.3.2 A l'échelle régionale (l'Algérie)

En Algérie, l'évolution récente du climat montre que le réchauffement est plus important que la moyenne et qu'il se manifeste sous forme d'une sécheresse. En effet sur les 40 dernières années les températures moyennes annuelles ont subi une augmentation de 0.5°C. Ainsi les sécheresses de la même période sont encore plus remarquables compte tenu du déficit pluviométrique enregistré un peu partout sur le territoire, particulièrement à l'Ouest du pays. La baisse de la pluviométrie dans cette période est estimée à environ 10% de la moyenne. Donc le changement climatique en Algérie se présente sous forme d'une sécheresse (**Abderrahmani, 2015**).

La diminution des pluies due aux sécheresses qui sévissent depuis le début des années 70 a entraîné une baisse constante des réserves d'eau souterraine des principales nappes aquifères du nord du pays. Dans beaucoup de plaines du pays, le niveau des nappes phréatiques a déjà chuté dans des proportions alarmantes (> 20 m.) (**Anonyme, 2009**).

L'aggravation des sécheresses conjuguée à la surexploitation des nappes phréatiques a entraîné la minéralisation des zones non saturées des nappes aquifères profondes, dans les régions semi-arides comme le plateau d'Oran et les hautes plaines occidentales. Le taux moyen d'utilisation des nappes phréatiques est de 79% dans la région Nord, il peut parfois atteindre et dépasser les 90% dans certaines zones (**Bates et al., 2008**).

Dans les régions côtières, la baisse des niveaux de pression hydrostatique a d'ores et déjà entraîné la pénétration d'eau de mer dans les réserves d'eau douce des nappes aquifères côtières des régions de la Mitidja, d'Oran, de Terga et d'Annaba (**Anonyme, 2009**).

I.4 Impacts sur la ressource en eau

I.4.1 Impact du changement climatique sur les eaux de surface

Plusieurs études indiquent que l'écoulement de surface a augmenté à l'échelle globale au cours du 20ème siècle (**Labat et al., 2004; Milly et al., 2005**). Cette évolution masque toutefois des tendances régionales opposées: les débits des fleuves ont augmenté de manière importante en Europe du Nord et au nord-ouest de l'Amérique du Nord tandis qu'ils ont eu tendance à diminuer en Europe du Sud et en Afrique sub-saharienne (**Franck L, 2008**).

I.4.2 Impact du changement climatique sur les eaux souterraines

Le dernier rapport du GIEC souligne l'insuffisance des travaux de recherche concernant l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. De plus les résultats existants sont très dépendants des spécificités locales. Généralement, le manque de données d'observations empêche d'établir des relations de cause à effet entre le changement climatique et les eaux souterraines, les chroniques des piézomètres étant soit trop courtes, soit trop influencées par les prélèvements et/ou les changements d'occupation des sols (**Vernoux, 2015**).

Les modifications climatiques interviennent à toutes les échelles de temps et ne sont pas un phénomène nouveau puisque le climat a changé de nombreuses fois en réponse au forçage des divers facteurs. Des liens entre le climat et les eaux souterraines existent donc à toutes les échelles de temps. Allant de réponses à court terme comme les variations de pression atmosphérique et les marées jusqu'à des réponses à long terme comme les variations climatiques à l'échelle de milliers d'années qui ont eu un effet sur la recharge passée et qui ont potentiellement un impact sur le comportement du système actuel. De plus, en comparaison avec les systèmes d'eau de surface, les systèmes souterrains tendent à répondre plus lentement (**Kelly et al., 2013; Walton, 2011**) aux variations des conditions climatiques. Ces perturbations induisent des changements hydrologiques qui peuvent potentiellement se répercuter sur la ressource en eau souterraine, en relation avec certains mécanismes propres à cette ressource (recharge, décharge, stock) et/ou ses caractéristiques (quantité, qualité).

I.4.2.1 Influence sur la recharge

La recharge des eaux souterraines peut être définie comme l'eau qui atteint un aquifère que ce soit verticalement ou latéralement (**Gerber et Howard., 2000**). Naturellement, la recharge des eaux souterraines peut localement avoir lieu à partir des compartiments d'eau de surface et/ou par l'alimentation diffuse des précipitations via la zone non-saturée (**Döll et Fiedler, 2008**) ainsi que par drainance d'aquifères. La plupart des systèmes hydrogéologiques sont alimentés par les deux types de recharge, mais la proportion de recharge diffuse diminue avec l'aridité de la région (**Lemer et al., 1990**). Néanmoins, les précipitations (efficaces) restent le paramètre climatique moteur de la recharge des systèmes souterrains (**Crosbie et al., 2010; Knutssen., 1988**). La sensibilité de la recharge aux variations climatiques est liée aux changements de la quantité de précipitation effective elle-même fortement dépendante de l'évapotranspiration (**Barron et al., 2011; Kumar, 2012**). Bien que les effets des variations climatiques sur la recharge soient difficiles à apprécier, certains indices conservés dans l'eau souterraine (signatures isotopiques des éléments constitutifs de l'eau et des concentrations en

gaz nobles) permettent de contraindre les conditions climatiques au cours de la recharge et la durée depuis laquelle cette recharge s'est effectuée (**Bakari et al., 2012**).

I.4.2.2 Influence sur la résurgence (décharge)

La décharge, est caractérisée par la circulation d'eau au sein d'une aquifère sortante de celui-ci. Les zones naturelles caractéristiques de décharge d'eau souterraine sont les réseaux hydrographiques, les marais, les zones humides, les lacs et les océans. L'intime relation existant entre ces compartiments d'eau de surface et la partie souterraine implique que si un de ces compartiments est impacté par le climat, les autres le seront aussi. Néanmoins, l'impact climatique sur la décharge est moins bien connu du fait du manque de données et de la difficulté à quantifier ces processus (**Van Vliet, 2007**). Les interactions des eaux souterraines avec les compartiments de surface sont aussi dépendantes des niveaux relatifs entre eux, l'impact du climat se fait donc ressentir indirectement par l'altération de la recharge et/ou des mécanismes de décharge (comme l'évapotranspiration).

I.4.2.3 Influence sur le stock (ou emmagasinement)

Du fait de l'affectation des entrées (recharge) et des sorties (décharge) du système hydrologique par les variations climatiques, le stock d'eau au sein du système est lui aussi modifié. Les variations de quantité d'eau (variation de l'emmagasinement) correspondant à la différence entre la recharge et la décharge sont dépendantes des propriétés du système souterrain et de l'échelle de temps suivant les processus considérés (pouvant aller de la journée aux milliers d'années) (**Alley et al., 1999**).

Les aquifères peu profonds sont plus sensibles aux variations climatiques se produisant sur des petites échelles de temps (**Kundzewicz et Döll, 2009**), contrairement aux systèmes profonds qui réagissent aux perturbations climatiques majeures sur de grandes échelles de temps (**Clifton et al., 2010**). L'influence des variations climatiques sur le stock d'eau dépendra aussi de la durée de renouvellement des eaux souterraines considérées (ressource renouvelable ou « fossile »). Ce concept des eaux souterraines non renouvelables fait référence à la durée de renouvellement des eaux. Dans certaines situations, le laps de temps nécessaire pour renouveler la ressource en eau souterraine peut être très long par rapport à la durée moyenne des activités humaines et aux plans de gestion associés (**Margat et al., 2006**).

I.4.2.4 Influence sur la qualité

Enfin, le climat n'affecte pas seulement la recharge, le stock et la décharge des systèmes souterrains, mais peut aussi influencer la qualité de l'eau souterraine (**Dragoni et Sukhija, 2008**). En effet, la qualité des eaux souterraines dépendante des propriétés physiques, chimiques et biologiques des aquifères est notamment contrôlée par les fluctuations climatiques. La perturbation de la recharge et de la température de l'eau modifie la chimie de l'eau, les communautés bactériennes, le transport de soluté et les temps de résidence (**Glassley et al., 2003; Van Vliet, 2007**). La salinisation des eaux souterraines constitue l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde (**Kloppmann et al., 2010**). L'intrusion d'eau salée peut donc être un problème majeur (**Cloutier et al., 2009**). Les variations climatiques peuvent entraîner des modifications du niveau marin (expansion des océans, fonte des glaces...) ainsi que des taux de recharge des aquifères et donc se caractériser par des intrusions d'eau de mer dans les aquifères par modification de l'équilibre existant (**Ranjan et al., 2006**). La qualité des eaux souterraines et donc leurs caractéristiques chimiques peuvent être des indicateurs de processus particuliers d'interactions entre l'eau et la roche ou d'évènements spécifiques de périodes climatiques passées (**Dragoni et Sukhija, 2008**).

I.5 Les études qui ont été fait dans le bassin méditerranéen

Plusieurs études d'impact de changement climatique sur les ressources en eaux souterraines ont été entreprises en Algérie ainsi que dans autre pays de la méditerranée, parmi les quelles :

El ibrahimi Abdelhamid et al (2015), ont travaillé sur l'étude de l'impact des variations pluviométriques sur les fluctuations piézométriques des nappes phréatiques superficielles en zone semi-aride (cas de la plaine de Saïss, Nord du Maroc). L'objectif de ce travail été de mettre en exergue l'existence d'une variabilité climatique, manifestée principalement par une variabilité dans la quantité des précipitations et leurs irrégularités au niveau de la plaine étudiée et à mettre en évidence son impact sur l'alimentation des réserves d'eaux souterraines. Les résultats de ces études montrent que la variabilité climatique caractérisée par une alternance de phases humides, normales et sèches ont été mises en évidence dans la zone d'étude. Les indices et méthodes statistiques indiquent l'existence d'une rupture en 2008-2009 enregistré essentiellement par des fluctuations des régimes pluviométriques. Les indications de cette variabilité climatique se sont répercutées sur les ressources en eau souterraine. Une diminution importante du niveau statique de la nappe phréatique superficielle apparaît dans les piézomètres témoins qui a atteint un niveau bas en 2002/2003, indiquant ainsi une anomalie dans le bilan prélèvement / recharge de la nappe superficielle.

Askar saida et tifrane hafidha (2017/2018), ont travaillé sur la variabilité climatique et sont impact sur les ressources en eaux souterraine dans la région de Haut et Moyen Cheliff. L'objectif de ce travail consiste à l'étude de l'impact de la variabilité climatique et de la sécheresse sur les ressources en eau souterraine.

Les résultats obtenus par l'étude de la sévérité de la sécheresse, en utilisant différentes indices comme ceux des indices de la pluviosité et l'indice standardisé de précipitations, confirment la persistance et l'abondance des années déficitaires durant les trois dernières décennies. Le niveau piézométrique (1988-2014) présente une évolution irrégulière caractérisée par une baisse durant la période de basses eaux sous l'effet de l'évaporation et une remontée pendant la période de hautes eaux, due à l'effet de la recharge artificielle (les lâchés d'eau à partir du barrage et/ou le drainage des eaux d'irrigation).

Ouis saliha (2012), a travaillé sur l'impact des fluctuations climatiques sur la quantité et la qualité des eaux souterraines d'une région semi-aride : cas de la plaine de Ghriss (Nord-Ouest algérien). L'objectif de ce travail consiste à traité l'impact de fluctuation climatique sur la dynamique de la nappe au niveau de ce secteur.

Les résultats de cette étude montrent une baisse continue dans l'ensemble des piézomètres étudiée, avec un rabattement maximal de 54,2 mètres en 11 ans. Cette diminution est principalement due à l'affaiblissement des précipitations et à l'augmentation du nombre de points d'eau et la surexploitation de ces nappes.

A la lumière des résultats des analyses physico-chimique, il apparait que les eaux captées par ces forages sont regroupés de deux faciès chimiques dominants : « bicarbonate calcique et magnésienne » et « chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne bicarbonate ». Elles sont assez minéralisées mais dans la limite de la potabilité.

Chapitre II :

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II. Présentation de la zone d'étude

II.1 Situation géographique

La région concernée par cette étude fait partie d'une vaste unité Hydrographique, le Bassin hydrographique Cheliff-Zahrez. Il s'agit de la partie Haute de la vallée du Cheliff, c'est une zone semi-aride correspondant au bassin du Haut Cheliff, qui fait partie de la zone Nord-Est du bassin hydrographique du Cheliff, situé entre 36°12' et 36°17' de latitudes Nord et 2°12' et 2°17' de longitudes Est (Figure II-1).

Le bassin versant du Haut Cheliff est limité au Nord par les monts du Zaccar, au Sud par les contreforts de l'Ouarsenis, à l'Ouest par le massif de Doui et à l'Est par Djebel Gountas. Hydrologiquement ce bassin versant est limité:

- Au Nord par le bassin du Côtier Algérois.
- Au Sud par le bassin amont du Cheliff.
- A l'Est par le bassin d'Isser.
- A l'Ouest par le bassin du Moyen Cheliff
-

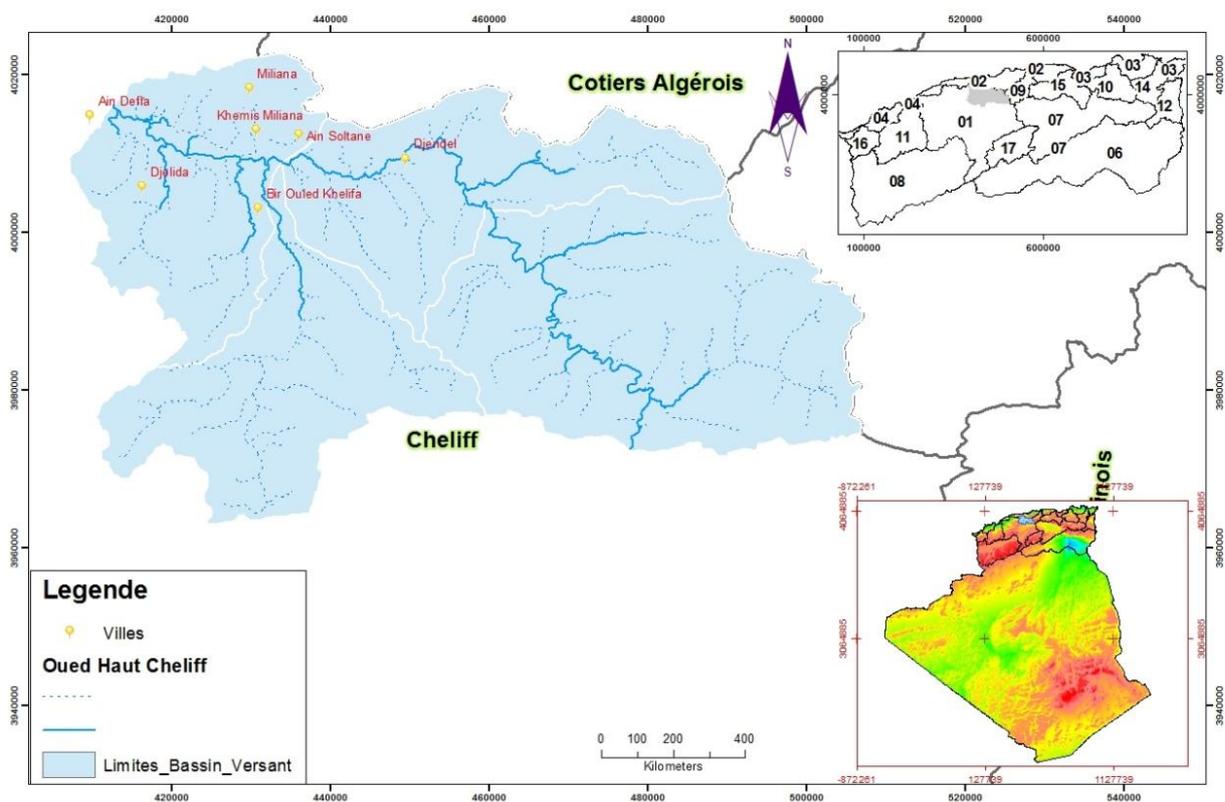


Figure II-1 : Localisation de la zone d'étude.

II.2 Caractéristiques morphologiques du bassin versant

Les différents paramètres morphologiques d'un bassin versant (superficie, périmètre, altitude, etc...) jouent un rôle essentiel dans la répartition des eaux et influent fortement sur l'hydrologie de ce bassin et notamment sur le régime d'écoulement. Pour le bassin du Haut Chélif objet de notre étude les paramètres morphologiques caractéristiques sont mentionnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II-1 : Paramètres de forme des sous bassins versants du haut Chélif.

Code	Nom Sous bassin	Superficie Km ²	Périmètre Km
0114	Oued Cheliff Ghrib	1379	175.7
0115	Oued Cheliff Harbil	780.2	165.3
0116	Oued Deurdeur	850.9	179.3
0117	Oued Cheliff Harreza	756.7	142.5

Le bassin versant de Haut Chélif est composé des sous bassins 0114, 0115, 0116 et 0117 (Figure II-2), couvre une superficie de 3766,8 Km² et un périmètre de 362 Km.

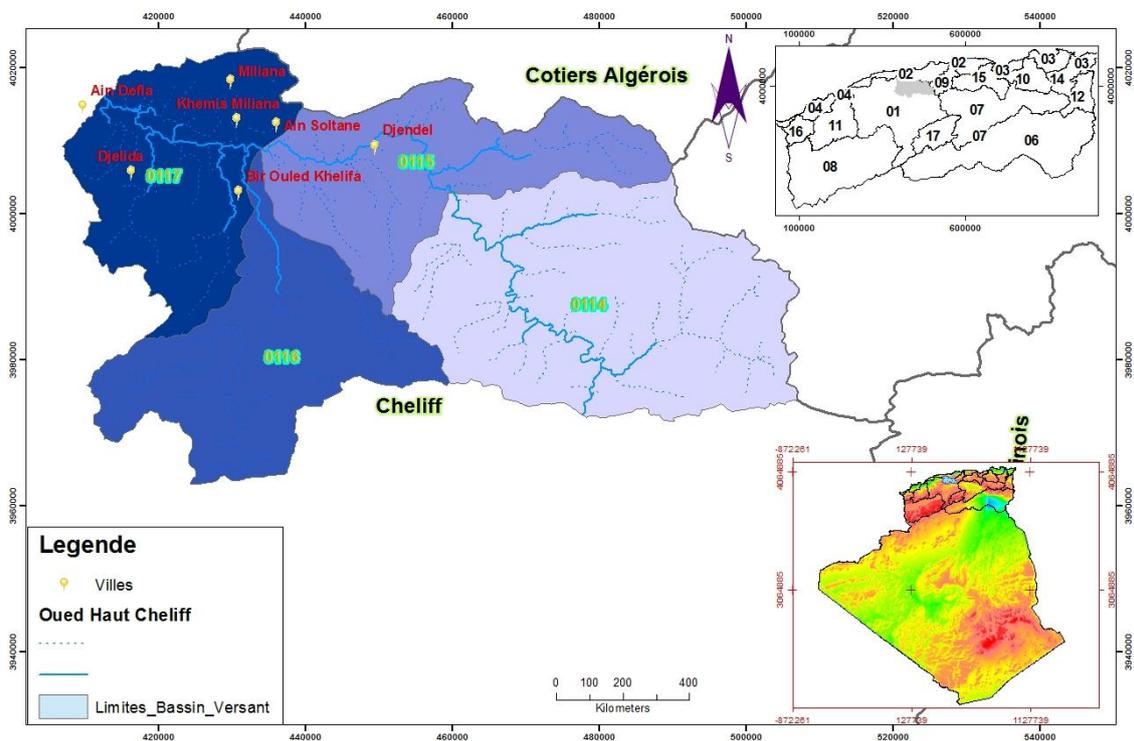


Figure II-2 : Carte des sous bassins du Haut Chélif.

L'analyse de la carte hypsométrique établie pour la zone d'étude montre que le relief de ce bassin versant assez variables, avec des altitudes variant entre 300 à 1100 m. (Mehaiguen, 2006).

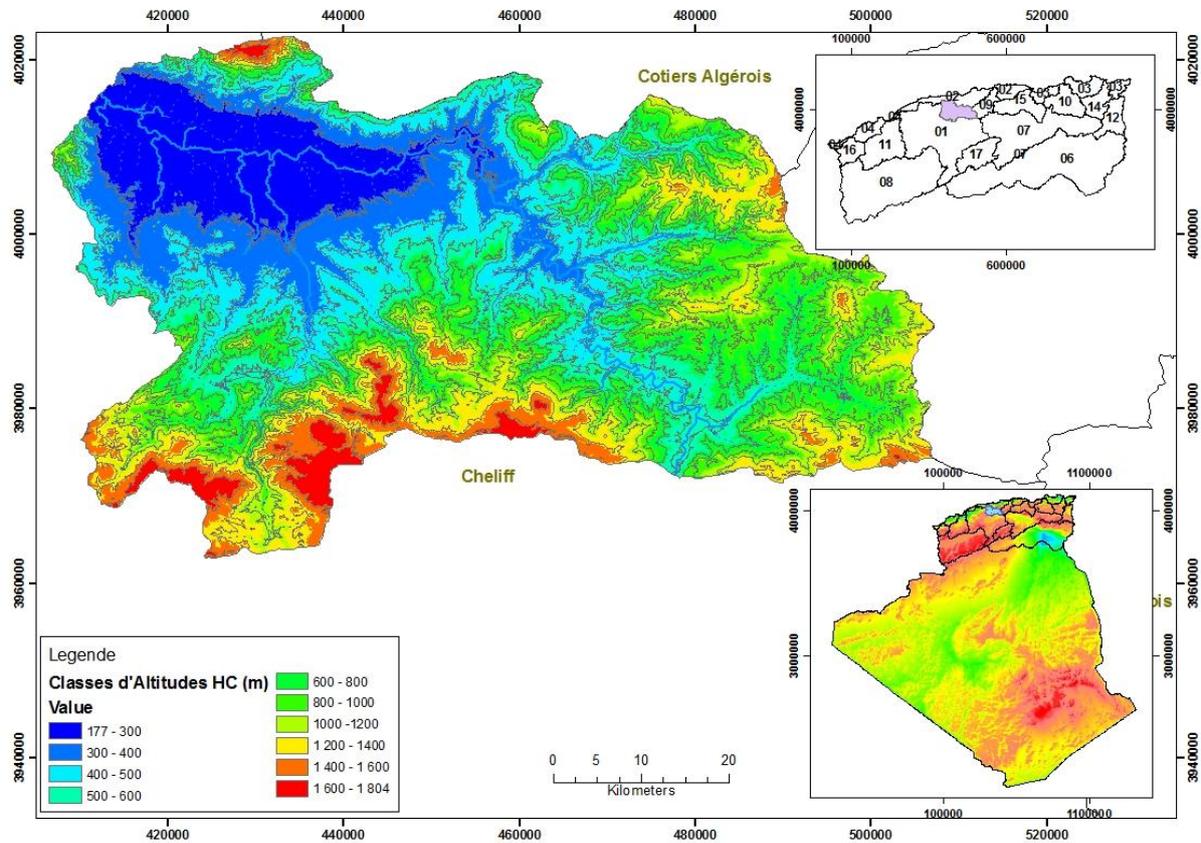


Figure II-3 : Carte de répartition des altitudes de la zone d'étude.

II.3 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique représente l'ensemble de cours d'eau permanents et temporaire, dont lequel s'écoulent les eaux de surface, la partie infiltrée dans les nappes constitue une composition d'écoulement souterrains (Bradis, 2006).

Le bassin versant de Haut Chélif est drainé par l'oued Chélif, qui s'écoule vers l'ouest et forme une cuvette intra-montagneuse à l'intérieur de l'Atlas tellien.

L'alimentation de l'oued se fait par les précipitations atmosphériques, par l'écoulement souterrain et en fin par les barrages.

Durant tout ce parcours, l'Oued Cheliff ne reçoit pas d'affluents importants sur sa rive droite sauf l'Oued Harbil (Figure II-4) mais sur sa rive gauche, il collecte les eaux de l'Oued Deurdeur et l'Oued Harreza.

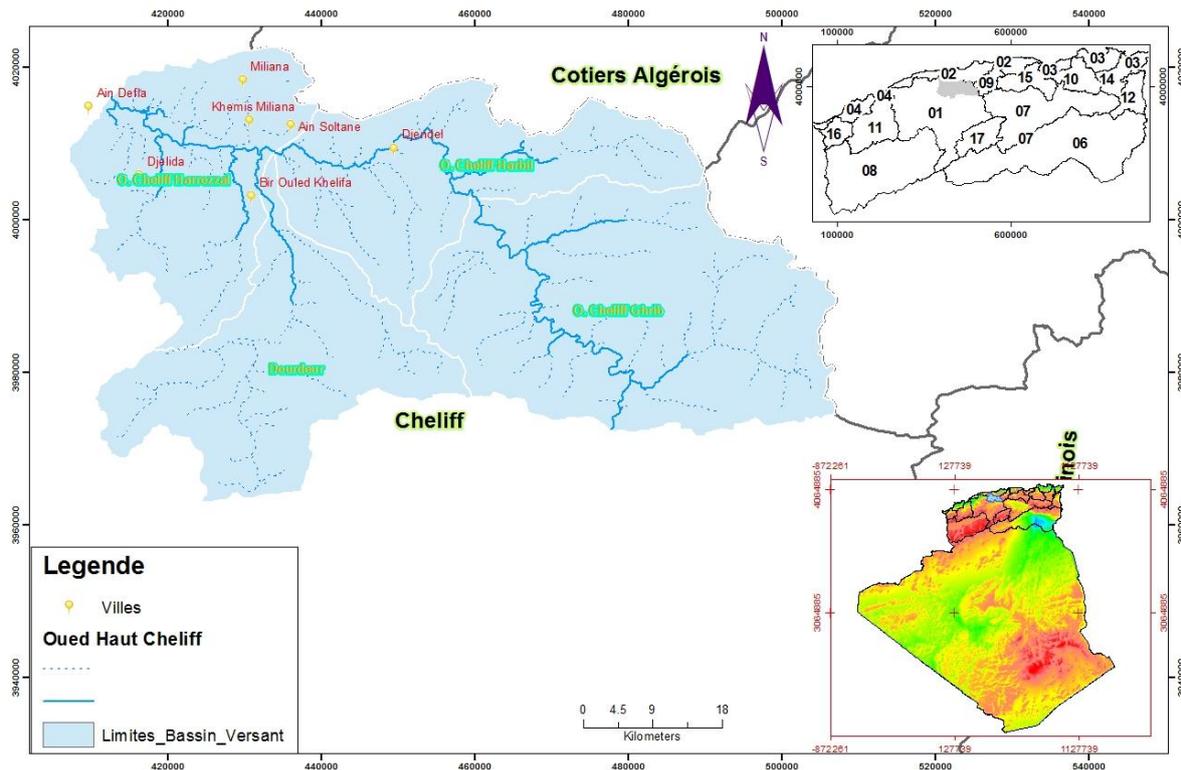


Figure II-4 : Réseau hydrographique du bassin du Haut Cheliff.

II.4 Aspect hydroclimatique du bassin versant du Haut Cheliff

Les conditions climatiques du bassin s'expliquent par sa situation géographique, le caractère de circulation atmosphérique, et par le relief de son territoire. La caractérisation du climat est établie en fonction des observations fournies par le réseau de mesures pluviométriques, hydrométriques et climatologiques installé au sein de la région d'étude.

Le bassin versant du Haut Cheliff est caractérisée par un climat semi-aride (Figure II-5), avec des influences sahariennes en été et des influences méditerranéennes en hiver, caractérisée par deux saisons distinctes : un hiver froid et un été chaud.

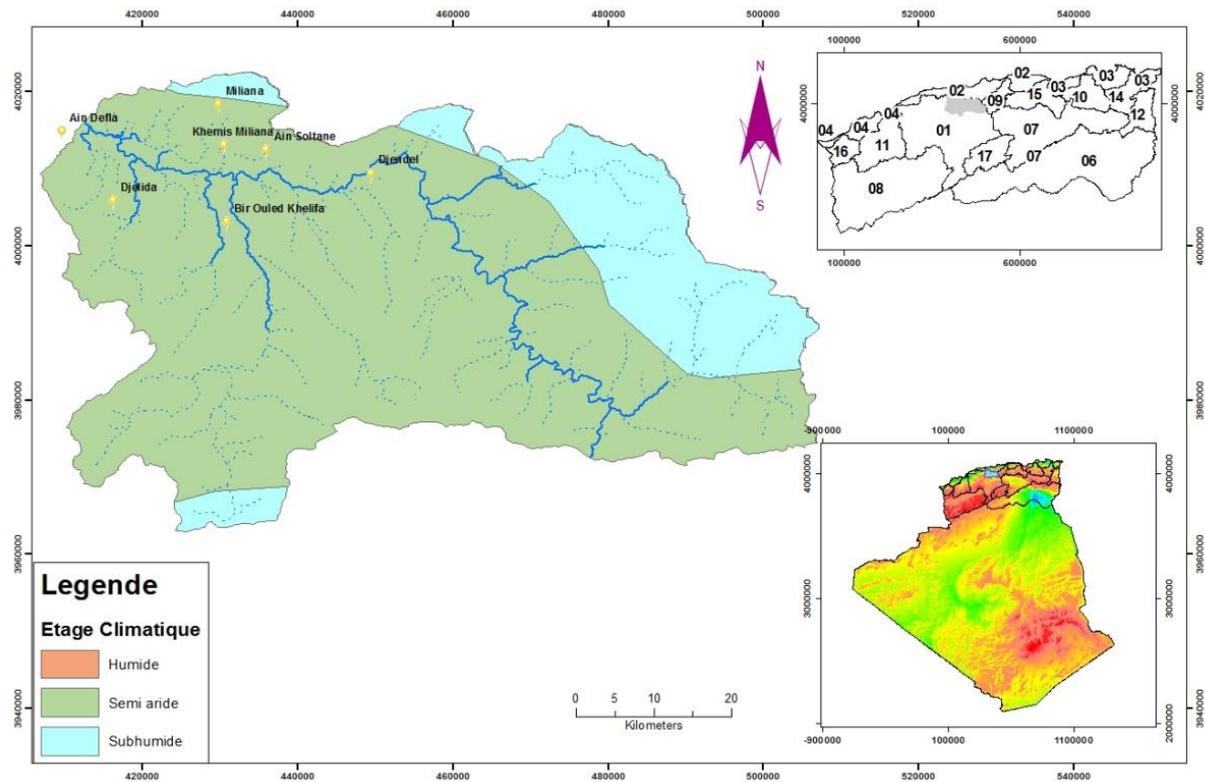


Figure II-5 : Extrait de la carte des étages bioclimatique du Nord d'Algérie.

II.4.1 Les précipitations

II.4.1.1 Les précipitations annuelles

Un extrait de la carte pluviométrique établie pour le bassin hydrographique du Haut Chélif a permis de déterminer les grands traits de la variabilité pluviométrique dans la région d'étude. En effet, les isohyètes se disposent en bandes plus ou moins parallèles et valeurs décroissantes du Nord au Sud, avec des altérations au niveau des chaînes telliens où intervient le rôle important de l'altitude l'espace (Figure II-6).

Par ailleurs, la région la plus pluvieuse se situe dans les massifs de Zaccar qui est plus proche de la mer avec plus de 700 mm à la station de Sidi Mejahed. Par contre, sur les Monts de l'Ouarsenis, plus au Sud, on enregistre des pluies moins élevées, plus de 400 mm à la station de Bordj El Amir Khaled. Dans la plaine, les pluies sont moins importantes. Elles varient de 300 mm à 400 mm.

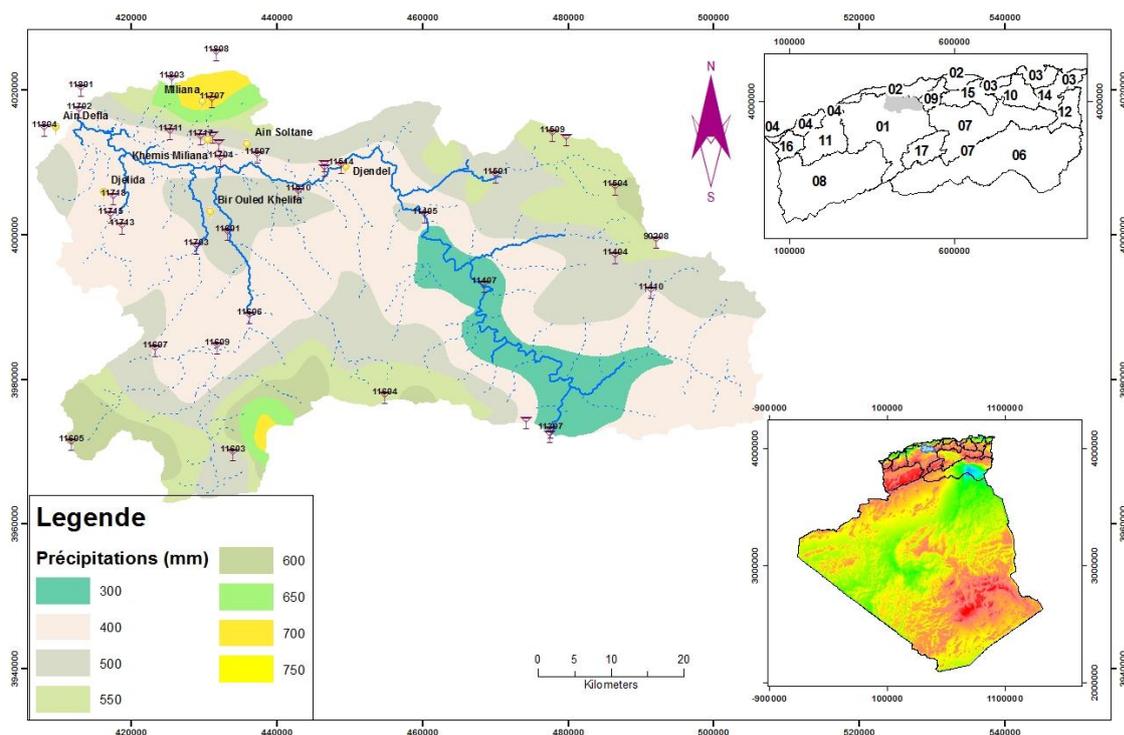


Figure II-6 : Extrait de la carte des précipitations moyenne annuelle.

L'analyse des données pluviométriques annuelles des stations (Sidi Mokerfi, Arib Chéouf, El Khemis ANRH et Harreza Barrage), enregistrées durant la période 1968 à 2017, montre que la région du Haut Chéouf est caractérisée par des séries pluviométriques quasiment identiques pour l'ensemble des stations, mais qui présentent une grande irrégularité de pluviosité dans le temps, avec des différences légères dans le temps et dans l'espace (Figure II-7). La moyenne annuelle enregistrée sur l'ensemble des stations est de 420.6 mm, avec une valeur maximale de 721,4 mm enregistré dans la station d'Arib Chéouf en 1971.

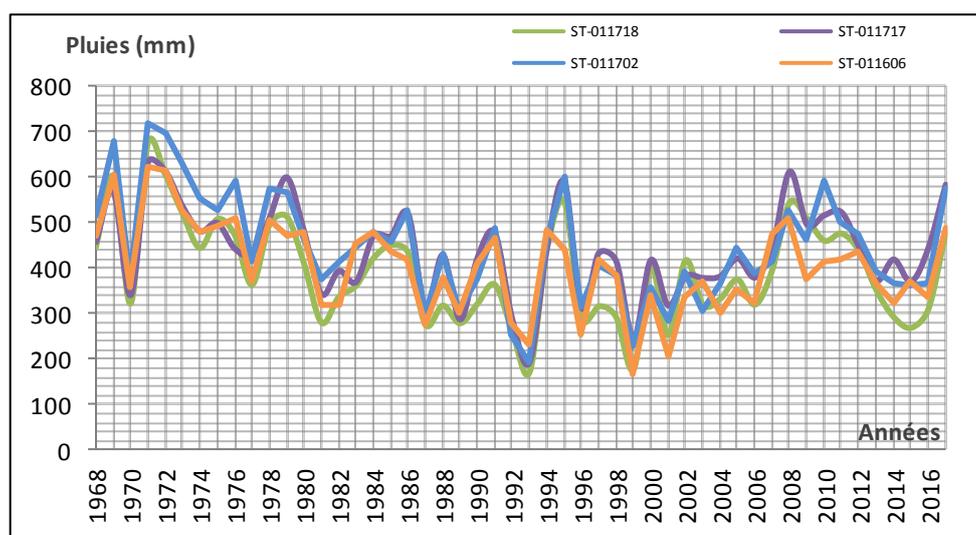


Figure II-7 : Évolution des précipitations annuelles (1968-2017).

II.4.1.2 Les précipitations mensuelles

L'analyse des précipitations moyennes mensuelles pour la période d'étude, au niveau des stations (El Khemis ANRH, Ain Defla, Ain Soltane, Arib Chéiff et Ghrib Barrage) montre que l'ensemble des stations pluviométriques présentent une saison pluvieuse allant de Novembre à Avril avec un maximum enregistré en février, où les précipitations atteignent 67,3 mm, les faibles précipitations sont enregistrées durant les mois de juillet et Août.

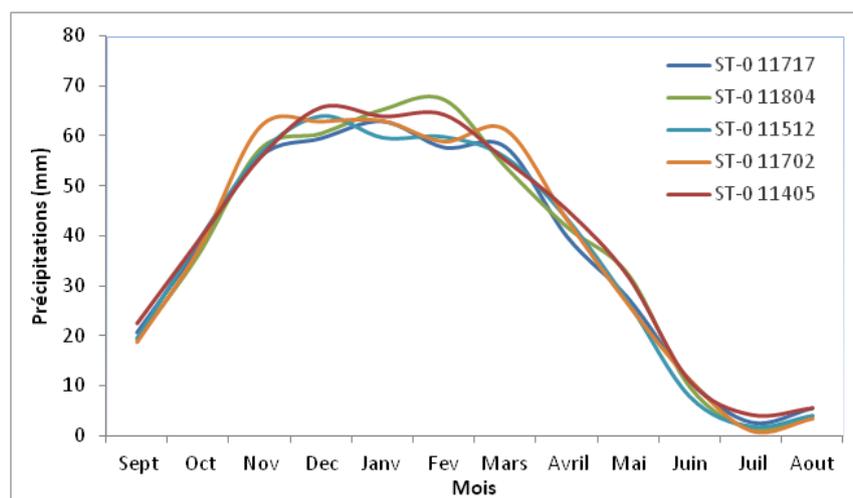


Figure II-8 : Précipitations moyennes mensuelles (1968-2017).

II.4.2 Les températures

II.4.2.1 La température moyenne annuelle

L'analyse de la variation des valeurs moyennes annuelles des températures enregistrées dans notre région figure ci-dessous, montre que la température moyenne annuelle varie au tour de 19 C°. La valeur la plus élevée a été enregistrée en 2010 avec une moyenne de 20,2 C° par contre la valeur la plus faible a été enregistrée en 1993 avec une moyenne de 15,7 C°.

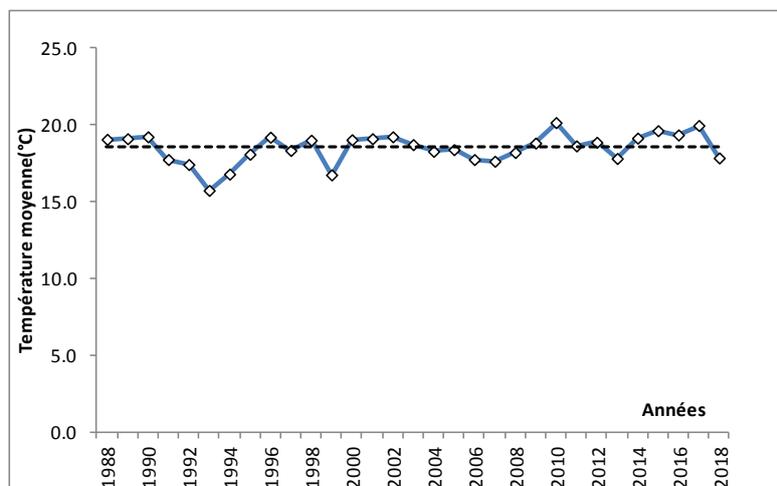


Figure II-9 : Température moyenne annuelle (Harreza, 1988-2018).

II.4.2.2 La température moyenne mensuelles

La température moyenne mensuelle est un facteur important dans l'estimation du déficit d'écoulement. Dans notre étude nous utiliserons les données relevées au niveau des stations de Khemis ANRH, Ain Defla et Harreza (Tableau II-2).

Tableau II-2 : Variation de températures moyennes mensuelles.

Mois		Sept	Oct	Nov	Dés	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Khemis (2002-2010)	T-Min	12.8	9.0	5.8	1.9	0.8	0.6	1.8	4.7	8.1	12.6	17.5	17.4
	T-Max	40.4	35.9	27.5	23.1	21.2	24.5	29.7	33.2	37.4	42.7	45.4	44.4
	T-Moy	24.6	20.5	14.5	10.8	9.6	10.8	13.5	16.4	20.8	26.5	30.0	29.1
Hrreza (1988-2018)	T-Min	16.7	12.0	7.0	4.7	3.2	4.0	7.0	8.1	10.8	15.7	20.7	21.4
	T-Max	35.0	29.7	22.9	17.9	19.9	17.8	22.6	24.0	30.3	36.4	37.8	38.4
	T-Moy	24.3	20.5	14.2	10.6	9.5	10.6	13.2	15.6	20.3	24.9	29.4	29.6
Ain Defla (2014-2018)	T-Min	19.63	15.33	10.21	7.88	6.21	7.88	7.75	11.58	15.03	19.23	23.08	23.48
	T-Max	33.30	28.93	20.83	16.73	15.50	17.08	19.85	25.38	30.15	35.03	39.80	39.15
	T-Moy	24.15	21.43	15.30	11.33	11.80	11.83	13.38	17.60	20.48	26.85	31.03	31.05

D'après la figure II-10, nous constatons une très légère différence entre les valeurs des températures enregistrées au niveau des trois stations climatiques de la zone d'étude, par contre leur variation mensuelle est la même. La température moyenne mensuelle la plus élevée est enregistrées en été durant le mois d'Aout au niveau de toutes les stations avec des valeurs qui fluctuent entre 29,6 °C et 31,05 °C, tandis que la plus basse est enregistrée en hiver durant le mois de janvier avec une moyenne fluctuant entre 9,5 °C et 11,33 °C.

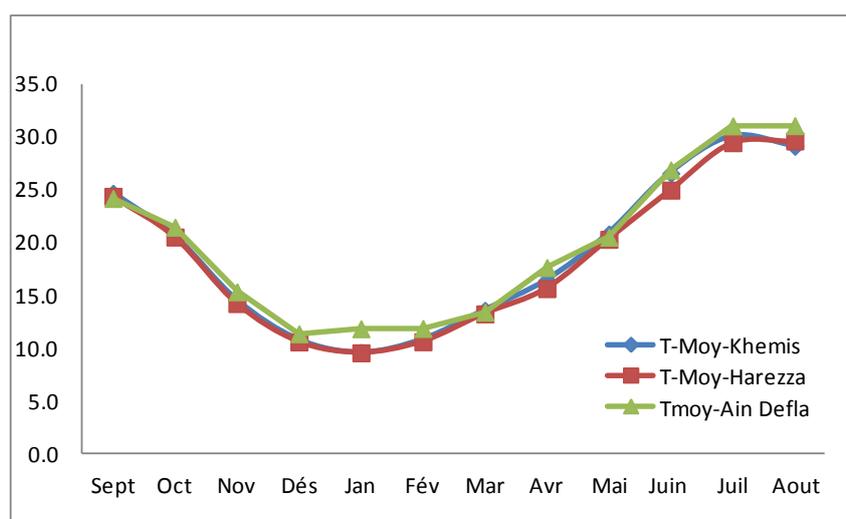


Figure II-10 : Variation des températures moyenne mensuelle (C°).

II.4.3 Diagramme de Gaussen

Selon Bagnouls et Gaussen (1953), un mois est dit sec si, « le total mensuel des précipitations exprimées en millimètres est égal ou inférieur au double de la température moyenne, exprimée en degrés ou en centigrades »; cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire des diagrammes ombrothermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes.

Tableau II-3 : Les valeurs de température (°C) et de pluviométrie (mm).

Station	011717		011718		011804	
Mois	P(mm)	T (°C)	P(mm)	T (°C)	P(mm)	T (°C)
Septembre	20.6	24.6	21.1	24.3	19.3	24.2
Octobre	37.8	20.5	32.7	20.5	36.3	21.4
Novembre	55.8	14.5	46.4	14.2	57.3	15.3
Décembre	59.5	10.8	51.0	10.6	60.5	11.3
Janvier	62.8	9.6	52.8	9.5	65.3	11.8
Février	57.6	10.8	52.0	10.6	67.3	11.8
Mars	57.7	13.5	53.0	13.2	53.8	13.4
Avril	39.8	16.4	38.8	15.6	41.8	17.6
Mai	27.4	20.8	27.1	20.3	32.2	20.5
Juin	11.1	26.5	10.7	24.9	9.7	26.9
Juil	2.7	30.0	1.9	29.4	1.4	31.0
Aout	5.6	29.1	4.9	29.6	3.9	31.1

Les valeurs des données de température et de pluies disponibles pour la région d'étude (Tableau II-3), ont permis de tracer les diagrammes ombrothermiques pour les trois stations (Harezza Barrage, Ain Defla, Khemis ANRH).

Les diagrammes de Gaussen (Figures II-11; a, b et c) permettent de mettre en évidence une saison humide débutant au mois d'octobre et se terminant au mois de Mai, et une saison sèche qui s'étale du mois de Mai jusqu'au mois de septembre. Ceci nous permet de conclure que la tendance des précipitations a un rapport direct avec la température de la région d'étude.

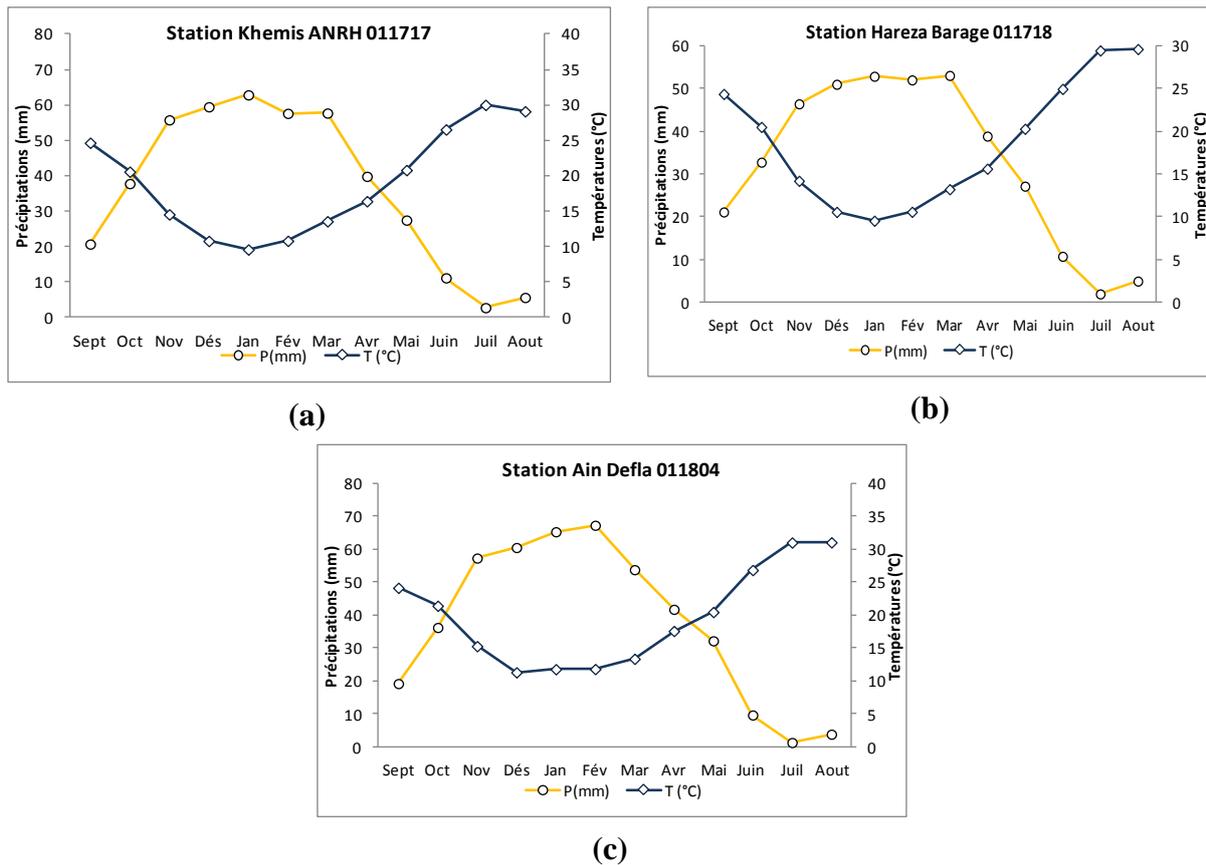


Figure II-11 : Diagrammes Ombrothermiques (stations de Khemis, Harezza et Ain Defla).

II.4.4 Évaporation

L'évaporation est la quantité d'eau restituée à l'atmosphère sous forme de vapeur, son étude est essentielle pour connaître le potentiel hydrique d'une région ou d'un bassin versant. D'après les données de l'évaporation enregistrées durant la période 1986-2017 à la station de Harreza, on remarque que la variation de l'évaporation mensuelle montre deux périodes bien distinctes tout comme les températures et les précipitations:

- Une période de forte évaporation allant du mois Mai au Mois d'Octobre dont elle atteint une valeur maximale de 300.7mm.
- Une période de faible évaporation allant du mois de Novembre au mois d'Avril ou elle atteint une valeur minimale de 44,2 mm (Figure II-12).

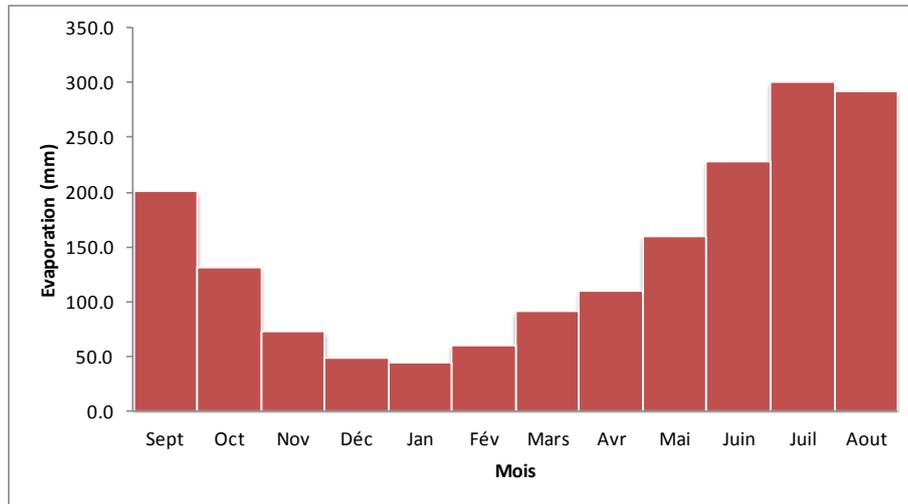


Figure II-12: Évaporation moyenne mensuelle (Période 1986-2017).

A l'échelle annuelle, on enregistre une faible évaporation durant la période allant de 1986 à 2017 d'où une valeur minimale de 75,5mm enregistrée durant l'année 2009. L'évaporation la plus forte à été enregistrée durant l'année 1988 avec une valeur de 193,6 mm (Figure II-13).

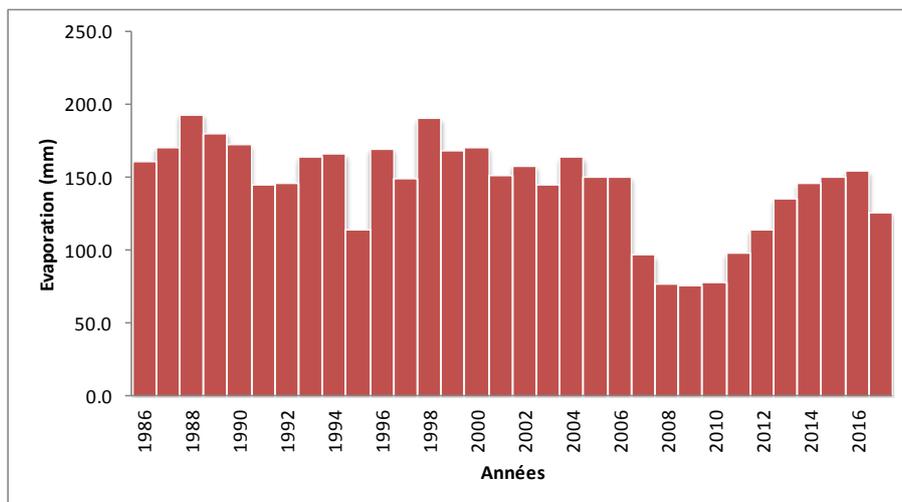


Figure II-13: Évaporation moyenne annuelle (Période 1986-2017).

II.5 Contexte géologique

Le bassin versant du Haut Chéiff est situé dans le domaine du tell septentrional et correspond à un sillon intra montagneux subsides, allongés grossièrement d'Est en Ouest, sur plus de 60 Km de long et une moyenne de 25 Km de large, et localisé entre le massif de Boumaâd et les contrefort de l'Ouarsenis d'après Perodon A, 1957; Mattaouer M, 1958. Du

point de vue litho stratigraphique, la dépression du Haut Chélif est constituée dans son ensemble par des terrains d'âges Mio-Plio-Quaternaire.

Les terrains Quaternaires sont essentiellement représentés par des dépôts alluvionnaires de l'Oued Chélif.

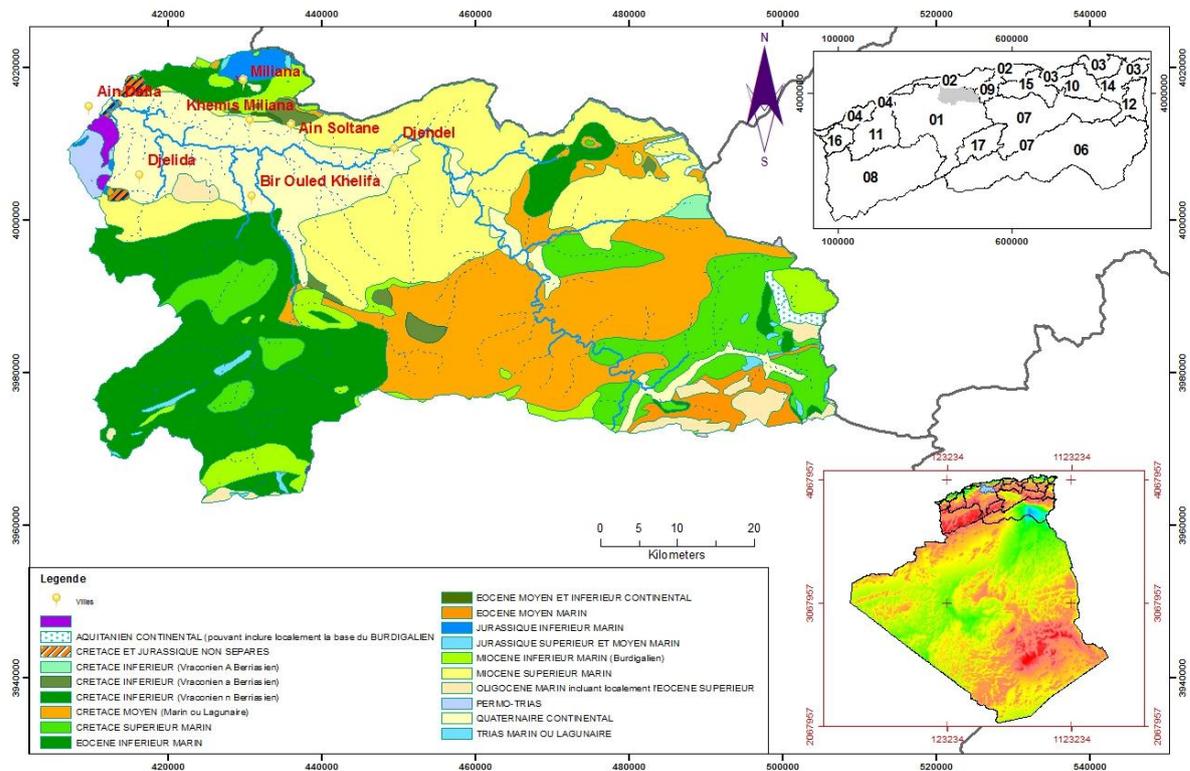


Figure II-14 : Carte Géologique du Haut Chélif.

II.5.1 Stratigraphie

Dans cette étude on s'est basé essentiellement sur les caractéristiques litho-stratigraphiques, d'après l'analyse du log litho-stratigraphique nous pouvons ressortir les différentes formations géologiques suivantes (Figure II-14).

✓ Le Primaire

Le Primaire est constitué d'une alternance des schistes noirs graphiteux et de bancs de quartzites et argiles.

✓ Le Trias

Le Trias est généralement constitué par des dolomies et des calcaires dolomitiques. Il affleure dans le massif de Zaccar.

✓ Le Jurassique

Le Jurassique est constitué, dans le massif de Zaccar par des calcaires massifs, compacts, fracturés et karstifiés et surmontés par des schistes gréseux et des marno-calcaires. L'ensemble de la série atteint une épaisseur de 700 m environ.

✓ Le Crétacé

Le Crétacé affleure sur les bordures latérales de la plaine, il est représenté de la base au sommet par :

- Des argiles schisteuses du Néocomien d'une épaisseur de 900m environ au Nord et à l'Ouest de Zaccar.

- Des facies flysch de l'Albien qui se développe dans le massif de Boumaâd.

- Des marnes avec des intercalations de bancs de calcaire d'âge Sénonien.

✓ Le Miocène

Le Miocène peu atteindre 1300 m d'épaisseur et il est constitué de la base au sommet par:

- Le Miocène inférieur (Burdigalien)

Le Miocène inférieur repose sur des terrains plus anciens Éocènes et Crétacés et débute par une formation conglomératique d'épaisseur environ 1000 m.

Cette formation est constituée essentiellement de conglomérats polygéniques à éléments de taille très variables, mal trié, avec des niveaux sableux ou gréseux mal stratifiés parfois gypsifères.

Au sommet, les niveaux conglomératiques deviennent plus fins et passent progressivement à des marnes gréseuses rouge à brune verdâtre.

- Le Miocène supérieur (Vindobonien)

Le Miocène supérieur est constitué par une série représentée de la base au sommet par des niveaux conglomératiques épais de 1 à 2 m à ciment sablo marneux, surmontés par un niveau marneux de couleur bleu d'une épaisseur environ 50 m.

Des marnes blanches alternant avec quelques bancs siliceux couronnés par un dépôt de grès et de sable d'une épaisseur d'environ 100 m.

Une formation marneuse de couleur bleu, représentant un faciès argileux parfois gypseux d'environ 90 m d'épaisseur.

✓ **Le Mio-Pliocène**

Le Mio-Pliocène est constitué par des galets quartzeux, des conglomérats, des grés et des argiles détritiques ainsi que le travertin ancien déposé au niveau des sources du Zaccar.

✓ **Le Pliocène**

On distingue un Pliocène marin et un Pliocène continental :

- **Le Pliocène Inférieur (Pliocène marin)**

Il est représenté par une série marneuse qui débute par des niveaux détritiques gréseux ou sableux et parfois conglomératiques, ensuite on a un passage progressif dans la partie supérieure à des marnes sableuses et sables argileux formant tous les termes de passage aux grés Astiens.

- **L'Astien**

Il est représenté par une série marine finement sableuse ou gréseuse de couleur jaune fauve. Les grés sont souvent à ciment calcaire, localement passer à des calcaires gréseux.

- **Le Pliocène Supérieur continental (Villafranchien)**

Le Pliocène continental est formé de conglomérats à éléments gréseux à grésocalcaires et des sables, non consolidés.

Les dépôts sableux rouges à stratifications entre croisées qui succèdent aux conglomérats précédents appartiennent au villafranchien.

Ces dépôts reposent le plus souvent sur les limons gris. Parfois les conglomérats du Pliocène supérieur n'existent pas et les formations rouges du villafranchien se trouvent alors en contact des grés astiens ; d'ailleurs, au Sud de Chélif sur la bordure de l'Ouarsenis, le Pliocène disparaît complètement. A ce niveau, le Quaternaire recouvre directement les calcaires gréseux du Miocène.

✓ **Le Quaternaire**

Les dépôts quaternaires sont continentaux. On distingue un Quaternaire ancien et un Quaternaire récent.

- **Le Quaternaire ancien**

Il est représenté essentiellement par des alluvions conglomératiques : Galets, graviers et des sables. Les alluvions du Quaternaire ancien sont observées au pied du massif de Zaccar et en particulier à l'Est de Sidi-Lakhdar. Elles forment les vastes collines en bordure Sud de la plaine d'El Khemis.

- Le Quaternaire récent

Le Quaternaire récent est formé essentiellement de limon, dont l'épaisseur varie de 50 à 200 m, on y distingue de base en haut:

- Des limons bruns à rouges, les niveaux les plus anciens sont discordants sur le Quaternaire ancien. Ces limons recouvrent la presque totalité de la dépression sous forme d'alternance sablo gréseuse.
- Des Grés, visibles surtout sur les berges des oueds, forment des accumulations de niveaux très fins dont les épaisseurs peuvent atteindre cinq mètres. Ce sont d'anciennes vases asséchées.
- Ces formations proviennent de l'érosion des reliefs avoisinants.
- Des alluvions actuelles formés de limons, de sables, de galets et de cailloutis au fond des talwegs et dans les zones de confluence des oueds et des méandres abandonnés.

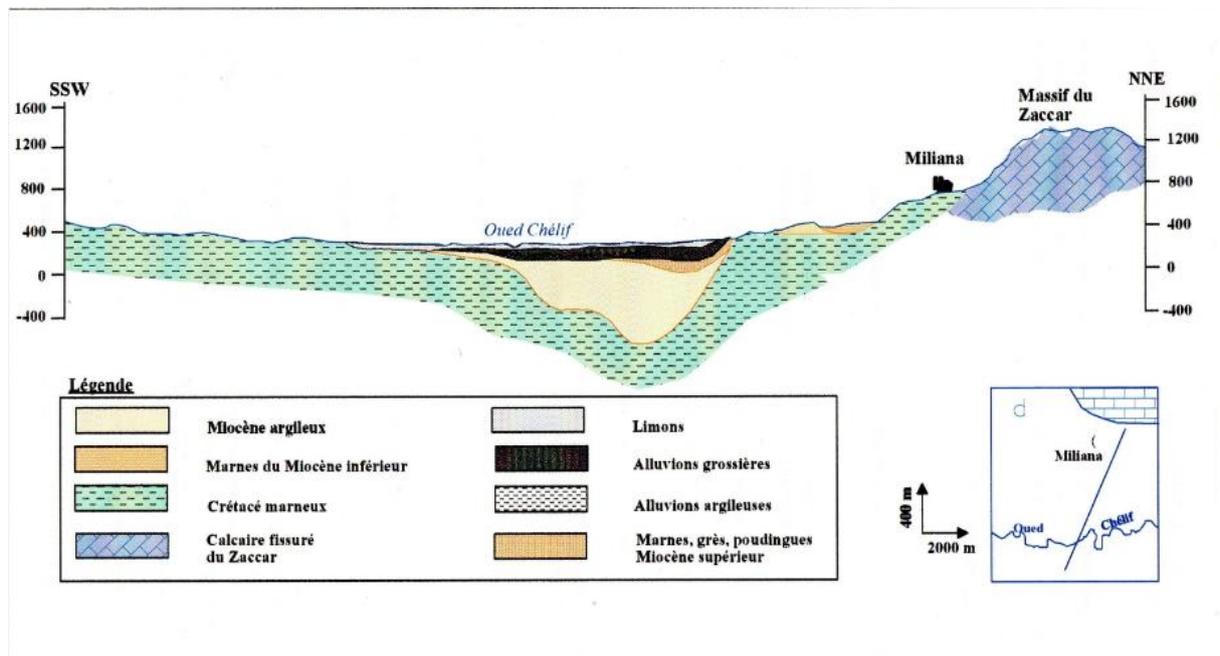


Figure II-15 : Coupe géologique dans le bassin Cheliff dans la direction Nord-Sud.

II.6 Contexte hydrogéologique

La synthèse géologique de la région, argumentée par une description lithologique et structurale et en s'appuyant sur l'examen de la série stratigraphique a permis de ressortir les niveaux aquifères suivants:

II.6.1 Les calcaires Jurassiques

Les calcaires Jurassiques affleurent au Sud d'Ain Defla avec une épaisseur considérables (environ 100 m jusqu'à 400 m et plus), Les calcaires d'âge Jurassique constituent un important réservoir Karstique qui se particularise par la présence des fissures représentatives d'un milieu approprié pour la circulation et le stockage de l'eau souterraine. Toutefois, la densité et la répartition mal connues et des forages posent d'énormes problèmes pour l'implantation des puits et des forages (leur puissance peut atteindre les 400 m) en raison des directions préférentielles que peuvent prendre les filets d'eau lorsqu'ils sont sollicités par un captage; des essais de traçage et des études spéléologiques seront d'un grand intérêt hydrogéologique.

II.6.2 Les aquifères du Miocène

Il se présente sous forme de conglomérats plus ou moins argileux et sableux. Les calcaires du Miocène affleurent le long de la limite Sud de la vallée.

L'observation de ces affleurements et les données de forages, suggèrent la présence d'espaces vides et de fissures internes ouvertes. Cette situation est provoquée par dissolution des carbonates sous l'influence de l'infiltration de l'eau de pluie, particulièrement le long des surfaces de contact. L'aquifère c'est développé dans ces espaces vides.

II.6.3 Les aquifères du Pliocène

Ce sont essentiellement les grès sableux jaunâtres de l'Astien, qui vont voir leur sommet se transformer en sables dunaires à hélix. L'épaisseur est très variable atteignant quelque fois les 100 m au Centre de la plaine et quelques mètres aux affleurements.

II.6.4 Les aquifères alluvionnaires du Quaternaire

Lors de l'examen des données de forages (puttings et sondages électriques), on s'est aperçu de l'importante épaisseur des formations quaternaires (sables, graviers ou grés), qui varie de quelques mètres à plus de 150 m, ce qui fait que cet aquifère est considéré comme étant le plus volumineux et le plus intéressant à étudier, vu l'importance socio-économique qu'il présente.

Toute fois notre étude dont l'objectif consiste à évaluer les réserves en eau souterraine est axée essentiellement sur l'aquifère alluviale du Haut Chélib qui constitue l'aquifère le plus important et le plus exploité dans toute la région de la plaine du Haut Chélib.

La synthèse géologique et hydrogéologique de la région, argumentée par une description structuro-litho stratigraphique montre que le Miocène inférieur est supérieur forme un cycle sédimentaire complet matérialisé par des dépôts importants de sédiments à dominance marneuse (supérieurs à 2000 m) parallèlement à une subsidence intense. Les sédiments plastiques facilitent par la suite la formation de plis réguliers. L'intensité de ces plis croît d'Ouest en Est avec l'augmentation de puissance des formations Miocènes (le synclinal perché du massif de Gontas).

Le Quaternaire se caractérise par une phase négative de remblaiement matérialisée par l'accumulation d'alluvions grossières. La plaine alluviale se limite à l'Est au niveau du seuil du Djendel, ce seuil à tectonique souple est représenté par les affleurements de grés, sables et marnes du Miocène supérieur. A l'Ouest, par contre, le seuil des Aribis, Doui se caractérise par sa tectonique cassante et par son âge ancien Jurassico-Primaire.

Ces deux seuils confèrent à la plaine alluviale un intérêt hydrogéologique certain, puisque l'Oued Chélib y pénètre par le premier seuil et en sort par le deuxième. Il descend du Djendel vers le seuil des Aribis-Doui. Les alluvions grossières sont surmontées par un couverture limoneux-argileux qui est considéré comme aquitard, ce qui donne le caractère local d'un semi-captivisme à la nappe, les formations du Mio-Plio-Quaternaire sont formées d'une nappe multicouche à porosité d'interstice.

Chapitre III :

MATERIELS ET METHODES

III. Matériels et méthodes de travail

III.1 Données utilisées

Les facteurs climatiques sont connus par leur grande importance dans la détermination des fluctuations du niveau piézométrique, cependant les données climatiques sont importantes à évoquer dans ce travail. Les données des précipitations et des niveaux piézométriques de la nappe utilisées, sont obtenues auprès de l'Agence Nationale des ressources Hydraulique (ANRH).

III.1.1 Réseau de mesure pluviométrique de la région d'étude

Le choix des stations étudiées a été mené de façon à avoir l'information nécessaire pour notre étude, de point de vue longueur des séries d'observation et de la répartition spatiale de ces stations à travers la région d'étude. Cependant, tenant compte des facteurs déterminants de la répartition des champs pluviométriques à l'échelle de la région du Haut Chélif; les différentes stations assez régulièrement réparties à travers l'espace étudié, comme le montre la figure III-1, la densité du réseau est très variable avec peu de postes dans les zones situées dans la partie Sud Est du bassin.

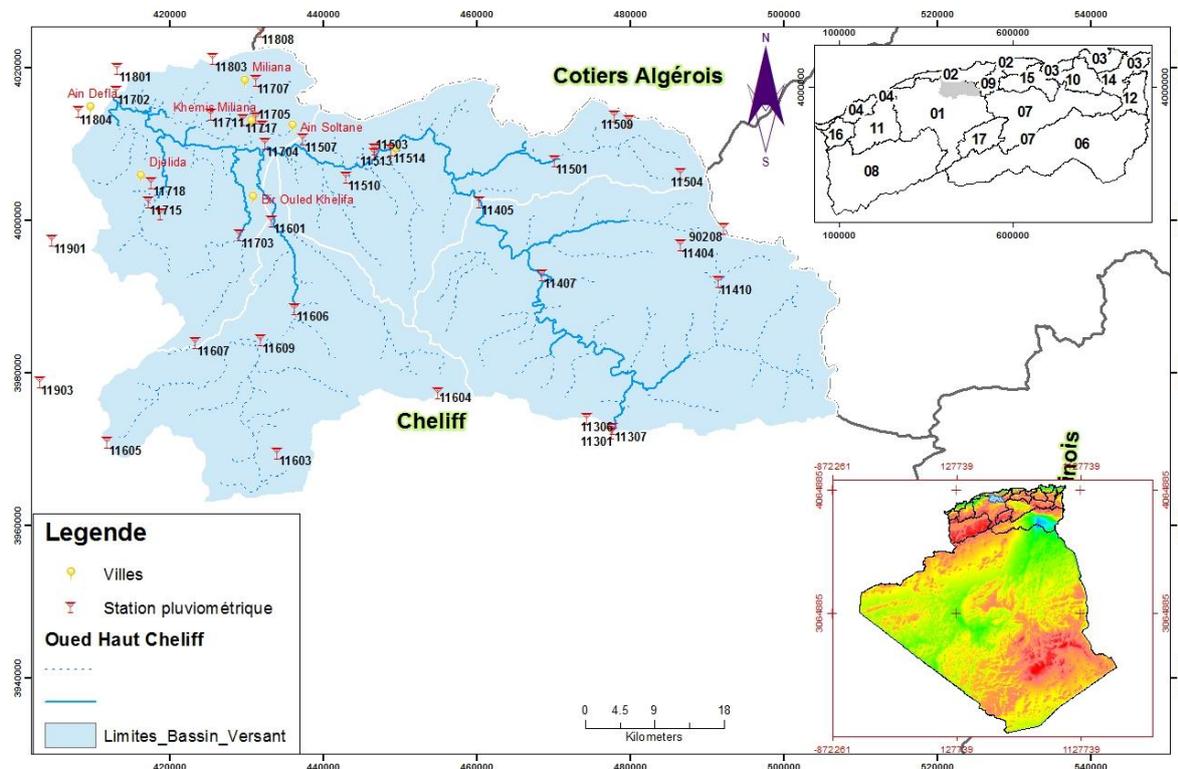


Figure III-1 : Localisation des stations pluviométriques utilisées.

Le réseau pluviométrique de la région du Haut Chélif comprend plus de 40 postes, gérés par l'Agence Nationale des Ressources en Eau. Ces stations sont très inégalement réparties du Nord au Sud et de l'Ouest à l'Est de la région, la plus forte densité du réseau se rencontrant au Nord et moins dense à l'extrême Sud (figure III-1).

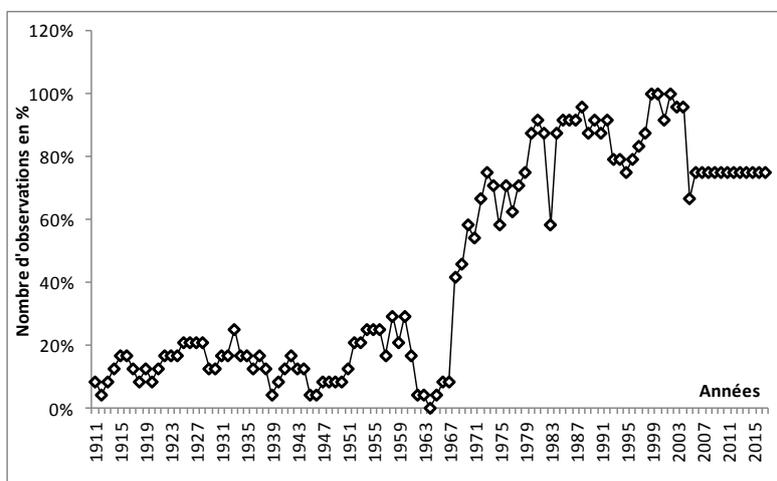


Figure III-2 : Disponibilité en données pluviométriques.

Dans ces conditions plus de 80% des stations pluviométriques disposent d'au moins 30 années d'observation. Nous avons retenu ces stations qui sont de nombre de 23 et disposant de plus de 30 années d'observations (Figure III-2). Les caractéristiques géographiques des stations pluviométriques utilisées sont décrites par le tableau III-1.

Tableau III-1 : Caractéristiques des stations pluviométriques.

Code	Nom	X(m)	Y(m)	Z (m)
11301	KSAR EL BOUKHARI GR	504550	288100	580
11302	DERRAG	472000	289850	1160
11404	ZOUBIRIA MONGORNO	513500	312800	1000
11405	GHRIB BGE	487250	318400	460
11507	AIN SULTAN	464100	326500	295
11509	MEDEA SECTEUR	504850	329800	934
11603	BORDJ EL AMIR AEK	461100	285300	1080
11604	KHERBA OD HELLAL	481900	293300	1290
11605	THENIET EL HAD	438950	286450	1160
11606	SIDI MOKREFI	463200	304250	425
11607	TARIK IBN ZIAD	450300	299600	650
11702	ARIB CHELIFF	439500	332550	230
11703	BORDJ EL AMIR KHALED	455850	313800	500
11706	EL KHEMIS INRA	458800	328200	285
11711	SIDI LAKHDAR	452000	329650	250
11715	EL ABABSA	443900	318050	313
11717	EL KHEMIS ANRH	456200	329000	300
11718	HARREZA BGE	444250	320550	342
11801	ARIB EBDA	439650	335550	280
11804	AIN DEFLA	434600	329900	270
11901	EL TOUAIBIA	431350	312850	360
11903	TOUTIA EL HASSANIA	430000	294200	220
11904	ROUINA MAIRIE	419800	327300	190

III.1.2 Réseau de mesures piézométriques de la région d'étude

Le réseau piézométrique permet de connaître à tout moment le niveau des nappes à l'aplomb des points de mesure. Il faut cependant noter que le niveau d'eau relevé dans un piézomètre est une donnée ponctuelle qui n'est pas représentative de l'ensemble de l'aquifère et ne doit pas être assimilé à une mesure des ressources en eau. La lecture des informations fournies par le réseau doit être réalisée au regard de règles d'interprétation prenant en considération les caractéristiques techniques de l'ouvrage, le contexte géologique, la pluviométrie et le caractère ponctuel de l'observation.

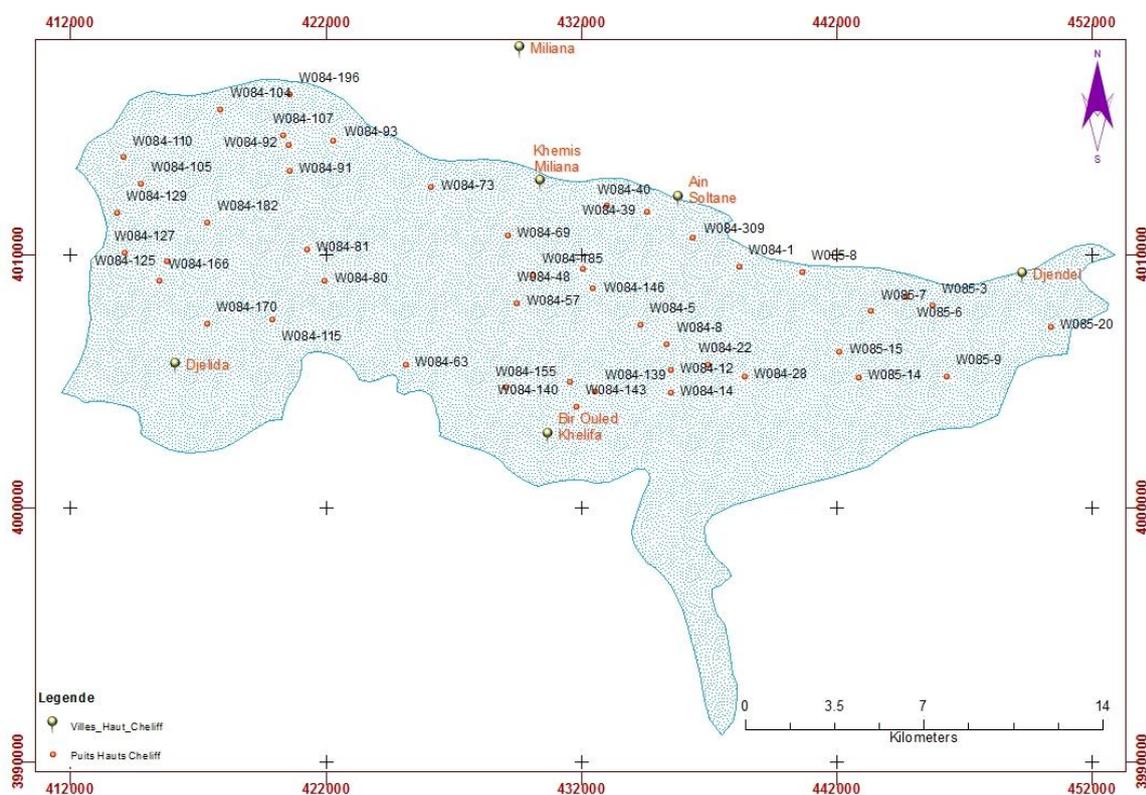


Figure III-3 : Carte de localisation des piézomètres du bassin du Haut Chélif.

Il est ici rappelé que la variable d'intérêt étudiée est la cote piézométrique du système aquifère alluvionnaire du bassin du Haut Chélif, issue d'une série de campagnes de mesure effectuées dans le temps et dans l'espace sur l'ensemble des piézomètres de la zone d'étude (Figure III-3).

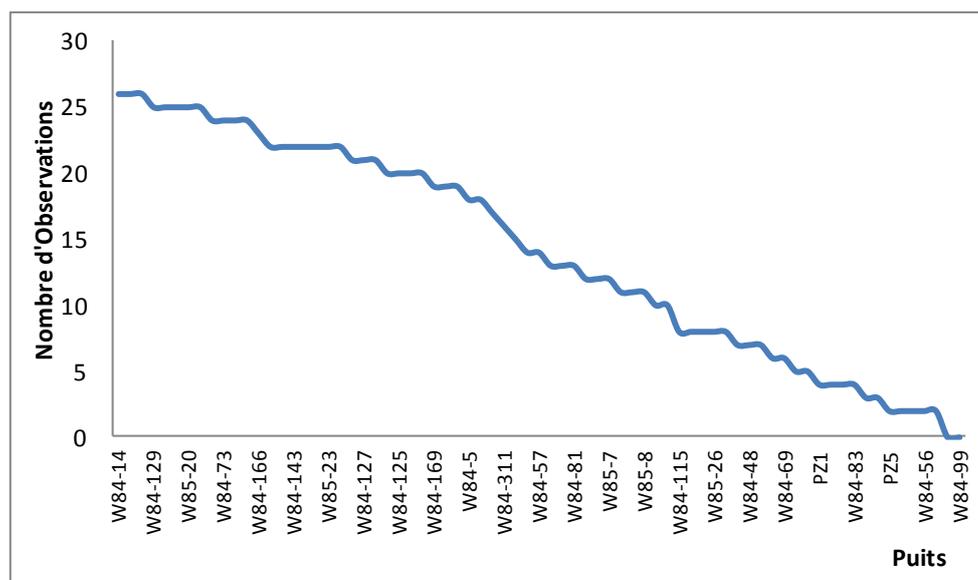


Figure III-4 : Disponibilité en observation des cotes piézométrique.

Les données disponibles en fonction des piézomètres sont représentées sur la figure ci-dessus, dont plus de 50% des piézomètres disposent au moins 10 observations durant la période allant de 1988 à 2015. Ces données sont collecter à travers un réseau de mesure piézométrique de 73 puits dans les caractéristiques géographique sont inscrits dans l'Annexe III- 1.

III.2 Méthodes de travail

L'approche adoptée pour atteindre les objectifs tracés dans ce travail, comporte les opérations suivantes:

- Analyse des tendances dans les séries chronologiques.
- La détection de rupture au sein des séries pluviométrique annuelles.
- Mise en évidence du changement climatique par les calculs des certains indices.
- Comparer les résultats obtenus avec l'évolution de l'état de la nappe de la plaine par l'observation de sa fluctuation à travers certains nombre de piézomètres.

III.2.1 Analyse des tendances dans les séries chronologiques.

III.2.1.1 Les moyennes mobiles

Les moyennes mobiles ou filtres linéaires des séries chronologiques, permet de lisser une série temporelle, en gardant la tendance et en supprimant la saisonnalité pour ensuite procéder a l'estimation de ces deux composantes.

Ces outils font partie des premières méthodes pour l'analyse des séries chronologiques. Il semble que le physicien Poynting soit le premier, en 1884, à avoir utilisé les moyennes mobiles pour éliminer les variations accidentelles ou périodiques d'une série. Puis à partir de 1914, les grands personnages de la statistique tels que Student, Pearson et Yule par exemple, s'intéressent à ce genre de problèmes.

La moyenne glissante, ou moyenne mobile trouve son application dans l'analyse des séries temporelles de données en permettant la suppression des fluctuations de façon à en souligner les tendances sur le long terme. Cette moyenne est dite mobile parce qu'elle est recalculée de façon perpétuelle, dès lors qu'une nouvelle donnée intègre la série en venant remplacer la plus ancienne, modifiant ainsi la date de référence. Cette façon de faire tend à lisser le phénomène étudié en noyant les valeurs extrêmes dans une masse de données davantage représentative d'une tendance moyenne.

III.2.2 Détection de la rupture au sein des série pluviométrique

Selon lubès et al. (1994), une rupture peut être définie de façon générale comme étant un changement dans la loi de probabilité d'une série chronologique à un moment donné le plus souvent inconnu. Une telle rupture marque une modification du régime pluviométrique ou hydrologique.

La stationnarité ou non stationnarité des séries pluviométriques intéresse beaucoup les utilisateurs de ces dernières dans les différentes applications (hydrologie, agronomie, gestion des ressources hydriques, etc.). La détection d'une ou plusieurs ruptures renseigne sur l'évolution pluviométrique dans la région donnée.

III.2.3 Analyse de rupture au sein des séries pluviométriques

Une approche statistique a été réalisée par Khronostat pour nous aider à mieux analyser les précipitations annuelles.

L'étude de la stationnarité des séries pluviométriques annuelles, appliquées à chaque série chronologique de chaque station pluviométrique, est un outil d'identification de la variabilité de la pluviométrie du Haut Chélif.

Le khronostat est un logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques développé par Jean-François Boyer à l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement, Université de Montpellier et l'École des Mines), disponible sur le site internet d'Hydro sciences Montpellier. Ce logiciel, a plusieurs méthodes de détection des ruptures.

III.2.3.1 Test de corrélation sur le rang [Lubes-Niel et al, 1998]

Le test de corrélation sur le rang est utilisé pour tester l'indépendance des éléments successifs et consécutifs d'une série. Ce test est fondé sur le calcul du nombre P de paires (Xi, Xj) pour lequel $X_i > X_j$ ($j > i, i = 1, N-1$).

Sous l'hypothèse nulle (Ho) de stationnarité de la série, la variable τ est définie par :

$$\tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1$$

Elle suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance égale à :

$$\sigma_\tau^2 = \frac{2(N+5)}{9N(N-1)}$$

Il en résulte que si l'hypothèse nulle Ho est vraie, la variable $U = \tau / \sigma_\tau$ est une variable normale réduite. Pour un risque α de première espèce donné, la région d'acceptation de l'hypothèse nulle est comprise entre $U_{1-\alpha/2} \sigma_\tau$ et $U_{1-\alpha/2} \sigma_\tau$

III.2.3.2 Statistique U de Buishand [Buishand, 1982; Buishand, 1984]

La statistique U de Buishand est de nature bayésienne et fait référence au modèle simple. En supposant une distribution a priori uniforme pour la position du point de rupture m, on définit la statistique U par :

$$U = [N(N+1)]^{-1} \sum_{K=1}^{N-1} (S_k^* / D_x)^2$$

Elle s'avère performante pour tout changement de moyenne survenant au milieu de la série cependant le test de Buishand est un test paramétrique faisant l'hypothèse d'une distribution normale des variables de la série. Le logiciel Khronostats nous permet de vérifier la normalité de la série étudiée et dans le cas où celle-ci serait refusait la série est alors modifiée (Racine Carrée, Logarithme, Box et Cox) pour que les données changées suivent une distribution normale.

III.2.3.3 Ellipse de Bois (Bois, 1972)

P. Bois a préconisé une méthode fondée sur le cumul des résidus. Elle permet de déterminer un seuil à partir duquel la cassure est significative. La difficulté revient à rechercher une courbe de contrôle telle que tout dépassement conduit à repousser l'hypothèse

d'homogénéité de la série avec un seuil de confiance Choisi. P Bois a montré que la courbe de contrôle a une forme ellipsoïdale (ellipse).

Cette méthode permet de dilater les différences, ce qui amplifie largement la clarté du graphique spécialement dans le cas où les écarts types sont faibles. Dès que les valeurs sortent de cette ellipse l'hypothèse H_0 est rejetée au seuil de confiance $1-\alpha/2$ soit un risque de 1^{ère} espèce α . La région de confiance est définie par :

$$\pm \frac{U_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{K(N-K)}}{\sqrt{(N-1)}} D_{Xi}$$

III.2.3.4 Test de Pettitt [Pettitt, 1979; Servat et al., 1997]

Le test de Pettitt est une approche non-paramétrique dérivée du test de Mann & Withney permettant d'identifier un point de rupture dans une séquence de variables aléatoires indépendantes $X_i, i = 1, N$.

Le test est plus particulièrement sensible à un changement de moyenne. Pour cela on définit la variable :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \text{ ou } D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \text{ tel que } \begin{cases} \text{sgn}(X) = 1 & \text{pour } X > 0 \\ \text{sgn}(X) = 0 & \text{pour } X = 0 \\ \text{sgn}(X) = -1 & \text{pour } X < 0 \end{cases}$$

La faiblesse du test a pu être mise en évidence (Lubes-Niel et al., 1998) sur les ruptures dans une série chronologique portant sur l'écart-type.

III.2.3.5 Segmentation de Hubert (Hubert, 1993; Hubert et Carbonnel, 1993)

La procédure de segmentation de séries chronologiques et hydrométéorologiques a été présentée par Hubert en 1989. Le principe de cette procédure est de diviser la série en m segments ($m > 1$) de telle manière que la moyenne calculée soit significativement différente de la moyenne du segment voisin.

Soit une série chronologique $X_i, i = 1, N$. Toute série X_i pour $i = i_1, i_2$ telle que $i_1 \geq 1, i_2 \leq N$ et $i_1 < i_2$ constitue un segment de la série initiale. Toute partition de la série initiale en m segments constitue une segmentation d'ordre m de cette série.

Soit une segmentation d'ordre m particulière, on définit i_k avec $k = 1, \dots, m$ le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ième}}$ segment avec par convention $i_0 = 0$, et $N_k = i_k - i_{k-1}$ la longueur.

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

La segmentation retenue au terme de la mise en œuvre de la procédure doit être telle que pour un ordre m de segmentation donné, soit minimum. Cette condition est nécessaire mais pas suffisante pour déterminer la segmentation parfaite.

Aussi, cette contrainte est aisée (satisfaite) par application du test de scheffé qui repose sur le concept de contraste. Ce test peut être considéré comme un test de stationnarité où H_0 est l'hypothèse nulle.

III.2.4 Indices climatiques

L'indice standardisé des précipitations (SPI) (McKee T.B et al., 1993) est un indice simple et robuste à la fois basé sur des données pluviométriques adopté par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) en 2009, comme instrument mondial pour la mesure des sécheresses météorologiques. Il permet de vérifier aussi bien les périodes/cycles humides que les périodes/cycles secs. Le SPI appliqué pour l'ensemble des stations de la région d'étude pour déterminer les périodes secs et les périodes humides au sein des séries pluviométriques. Toutefois, il faut au moins des relevés pluviométriques mensuels étalés sur 20 à 30 ans (de préférence, sur 50 à 60 ans) pour calculer le SPI (Guttman, 1994).

Pour la classification des épisodes secs et humides, McKee et al. (1993) ont utilisé le système de classification des valeurs de l'indice SPI figurant dans le tableau 3 pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur des indices.

Le SPI est donné par la formule suivante : $SPI = \frac{(P_i - P_m)}{\sigma}$

P_i : Précipitation de l'année i

P_m : Précipitation moyenne

σ : Écartype

Ensuite une grille de classification d'un épisode de sécheresse à été établie pour une échelle de temps:

Tableau III-2 : Classes de l'indice standardisé des précipitations (SPI) (McKee et al. 1993).

Valeurs du SPI	Catégories de sécheresse
2,0 et plus	Extrêmement humide
1,5 à 1,99	Très humide
1,0 à 1,49	Modérément humide
-0,99 à 0,99	Proche de la normale
-1,0 à -1,49	Modérément sec
-1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extrêmement sec

III.2.5 Interpolation piézométrique à l'aide de la géostatistique

Face à la demande accrue du public d'avoir une information détaillée et fiable sur l'évolution de la ressource en eau souterraine, la modélisation spatiale constitue un élément fondamental de la chaîne d'outils de gestion de la ressource en eau. Une étude comparative de avait été proposée (IBTISSEM TRIKI et al., 2014), afin de tester trois méthodes d'interpolation spatiale, déterministes et stochastiques, disponibles dans l'extension « Geostatistical Analyst » d'ArcGis, dans le but de déterminer la méthode d'interpolation spatiale qui fournit une représentation satisfaisante du modèle piézométrique du système aquifère phréatique de Sfax (Sud-Est de la Tunisie).

Le couplage des techniques de modélisation spatiale à celles des SIG a beaucoup évolué ces dernières années, grâce aux progrès de l'informatique. D'une part, les logiciels de traitement géostatistique se sont enrichis d'outils simplifiés de représentation géographique, voire, plus récemment, de fonctions d'import/export pour communiquer avec des logiciels SIG ; d'autre part, le logiciel ArcGis ont intégré les extensions Spatial Analyst, 3D Analyst, plus récemment complétées par Geostatistical Analyst (Thomas 2003).

Les résultats indiquent la supériorité de la technique du krigeage universel par rapport aux estimations déterministes, avec une diminution de l'écart type des erreurs d'estimation allant jusqu'à 25 %.

Pour cartographier la piézométrie, on a choisi la méthode d'interpolation par krigeage. Dans ce cas le krigeage ordinaire n'est pas applicable et c'est le krigeage universel qui est le plus approprié. La calibration du modèle d'interpolation mis en œuvre dans l'interface du Geostatistical wizard s'est déroulée en plusieurs étapes.

Cependant, après avoir fait plusieurs essais, nous avons finalement retenu une fonction de distribution de la variable niveau piézométrique (Figure III-5). Cette étape consiste à élaborer un modèle de semivariance : en visualisant la surface et le nuage variographique à des pas de distance différents, on identifie un comportement isotrope. Par la suite, un

variogramme omnidirectionnel à été établi pour chaque compagne piézométrique et différentes cartes ont été réalisées pour la région d'étude.

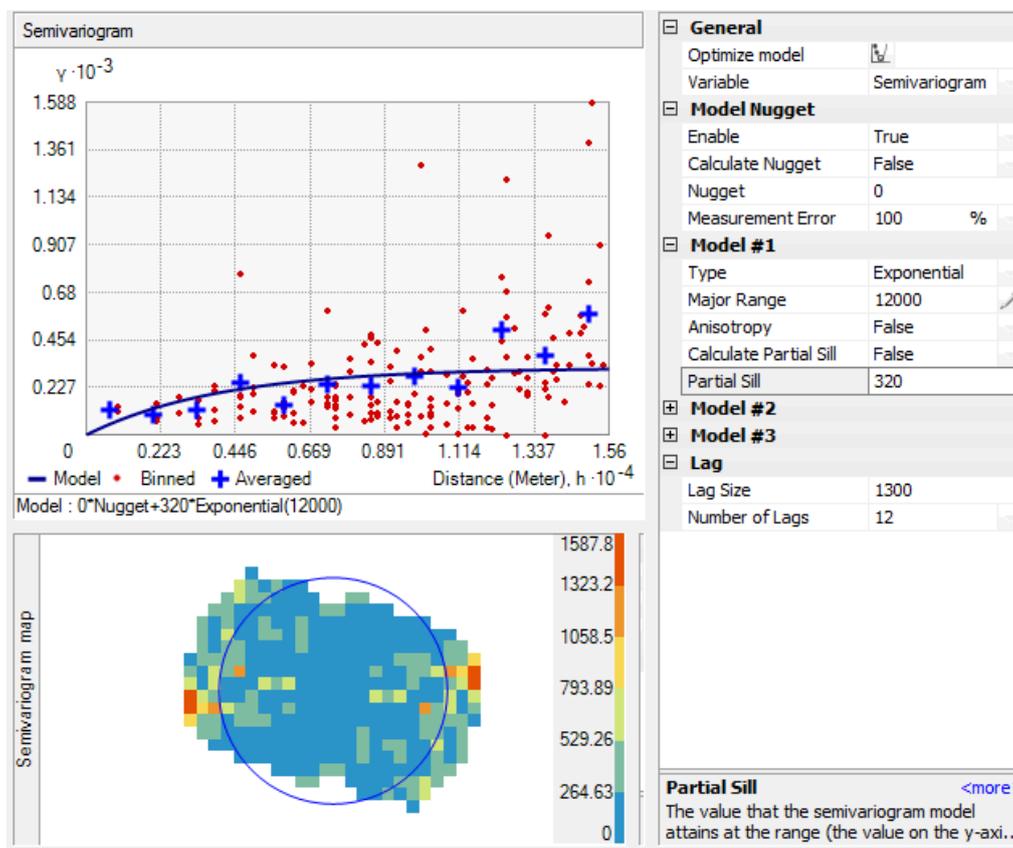


Figure III-5 : Analyse géostatistique des données piézométriques sous ArcGis.

III.2.6 Établissement des profils des cotes piézométrique

Afin de comparer les niveaux piézométriques et d'analyser la fluctuation de ces derniers dans le temps, des profils piézométrique ont été réalisés pour les différentes compagnes de mesures. Ces profils ont été réalisés à l'aide de l'extension « 3D Analyst » d'ArcGis, dans le but de superposer plusieurs compagnes piézométriques et de faire une représentation spatiale et temporelle des niveaux piézométrique du système aquifère de la zone d'étude.

Chapitre IV :

RESULTATS ET DISCUSSION

IV. Résultats et discussion

IV.1 Analyse des tendances dans les paramètres climatique

IV.1.1 Analyse des tendances de température

La température est un paramètre clé dans l'étude et la caractérisation des climats vue son rôle prédominant dans le rayonnement et le bilan énergétique, d'où son importance capitale dans les études qui touchent de près ou de loin le domaine du changement climatique.

La température représente donc un facteur limitant vue son implication dans le contrôle de l'ensemble des phénomènes métaboliques et par ce fait le conditionnement total de la répartition de tous les êtres vivants.

IV.1.1.1 Analyse des tendances dans les séries de températures

L'analyse des tendances de température de la région d'étude a été menée à travers les données disponibles relatives à la station de Harreza sur une période de 31 ans allant de 1988 à 2018. L'objectif de cette partie est de caractériser la tendance générale du climat durant cette période dans la région de notre étude.

Pour les besoins de cette analyse, il est important d'avoir en notre disposition les différentes températures caractéristiques de la région d'études à savoir : les maxima (T-Max), les Minima (T-Min) et la moyenne (T-Moy).

L'analyse des tendances par la méthode de moyenne mobile sur trois ans réalisée sur les séries des températures caractéristiques (Figure IV-1, a, b et c), met en évidence les constatations suivantes:

- Les températures maximales, ont connu une tendance significative à la hausse et atteignent une valeur maximale de 39.5 °C.
- Les températures minimales, ont connues une tendance à la baisse et atteignent une valeur minimale de 5.5°C.
- La température moyenne varie au tour de 18 °C avec une tendance à l'augmentation de 0.5 °C/an en moyenne.

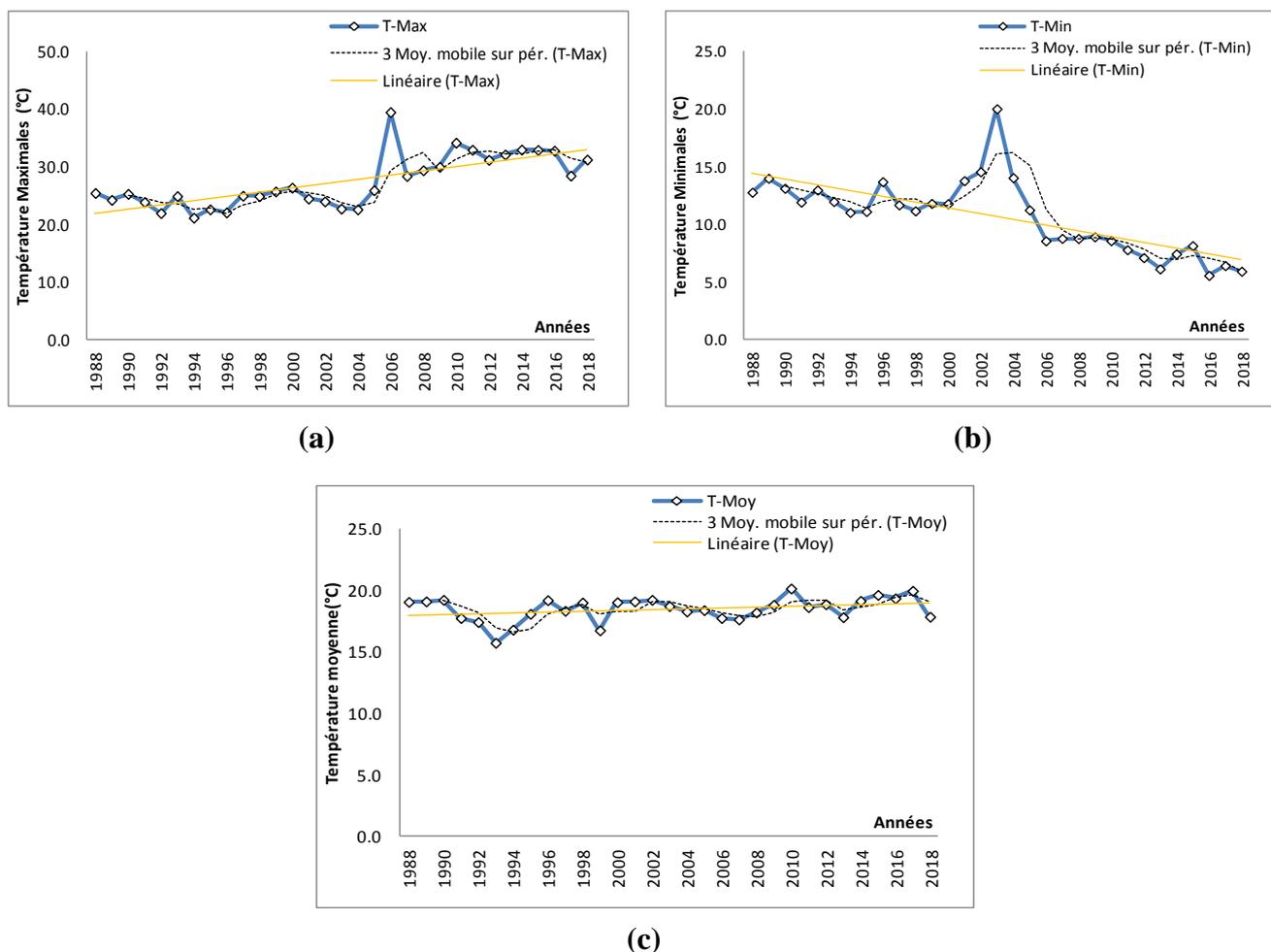


Figure IV-1 : Évolution des tendances temporelles des températures (a) – Max, (b)- Min et (c)- Moyennes, (Station de Harreza 1988-2018).

IV.1.2 Évolution des tendances dans les séries des précipitations

L'Algérie, vive depuis ces dernières décennies des changements du régime pluviométrique très importants, de nombreuses interrogations peuvent être posées quant aux causes, aux conséquences, voire à l'existence d'une variabilité de la pluviométrie. La première question, pour nous concerne un éventuel changement de la pluviométrie annuelle, notamment dans la région Chélif. Ces changements ont une influence négative sur les ressources en eau souterraine et superficielle (recharge des nappes et remplissage des barrages réservoirs...) et sur le rendement agricole.

En hydrogéologie, la mesure de la valeur exacte des précipitations idéales a une grande importance pour l'estimation de la recharge. Cette estimation elle dépend de la densité et la répartition spatiale du réseau pluviométrique.

Les précipitations sont un des processus hydrologiques les plus variables. D'une part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et ceci quelle que soit l'échelle spatiale prise en compte (régionale, locale, etc.). D'autre part, elles sont caractérisées par une grande variabilité dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

IV.1.2.1 Statistiques descriptive des données pluviométriques disponibles

Les données pluviométriques disponibles à travers la région d'étude, présentent des séries d'observations qui suivent à priori des distributions normales, cela se traduit par la distribution des valeurs des paramètres centraux caractéristiques de ces séries (moyenne et médiane) dont les valeurs sont très proches (Tableau IV-1). Les écarts interquartiles enregistrés à travers l'ensemble sont aussi distribués d'une manière symétrique par rapport aux valeurs centrales.

Tableau IV-1 : Caractéristiques statistiques des séries pluviométriques.

Code	Nom	Min.	1 ^{er} Quart	Median	Mean	3 ^{ème} Quart	Max.
011301	KSAR EL BOUKHARI GR	154	244.9	275.9	280.7	317.9	509.4
011302	DERRAG	316	431.8	525.2	528.3	614.9	832.1
011404	ZOUBIRIA MONGORNO	238.1	441.3	530.6	530.1	610.5	937.2
011405	GHRIB BGE	237.5	391.4	457.5	463.9	536.8	779.3
011507	AIN SULTAN	209.7	340.6	423.4	437.4	498.4	714.1
011509	MEDEA SECTEUR	372	572.3	669.1	647.3	759.5	959.5
011603	BORDJ EL AMIR AEK	241.5	376.8	454.9	440.6	507.4	639.2
011604	KHERBA OD HELLAL	14.4	218.6	310.1	316.7	401	723.5
011605	THENIET EL HAD	183.2	472.8	561.7	547.5	647.5	772.5
011606	SIDI MOKREFI	168.6	338.9	412.4	404.2	478.7	622.2
011607	TARIK IBN ZIAD	223.5	372.2	479.4	490.2	566.5	1042.6
011702	ARIB CHELIFF	194.4	368.9	438.5	447.5	528.5	721.4
011703	BORDJ EL AMIR KHALED	174.1	291.4	377.1	400.2	473.9	1067.4
011706	EL KHEMIS INRA	174.3	384.2	440.3	427.6	491.8	624.6
011711	SIDI LAKHDAR	184.8	337.5	397.1	405.8	467.2	629.7
011715	EL ABABSA	185.4	312.1	374.4	373	435.3	608.7
011717	EL KHEMIS ANRH	192.1	378.4	438.2	438.3	498.6	633.6
011718	HARREZA BGE	169.9	316.2	385.2	392.6	469.6	675.7
011801	ARIB EBDA	282	430.9	522.2	506.5	583.8	771.3
011804	AIN DEFLA	246.9	371.6	451	448.7	534.6	627.1
011901	EL TOUAIBIA	157.5	245.8	304.9	312.8	364.7	594.5
011903	TOUTIA EL HASSANIA	228.8	393.4	480.2	471.2	520.7	876.6
011904	ROUINA MAIRIE	199.5	299.6	343.9	362.1	427.9	595.5

Une représentation des caractéristiques des séries pluviométriques en boîte à moustaches (box plot) (Figure IV-2), montre que la pluviométrie annuelle est caractérisée par une irrégularité dans l'espace. La région a connue des précipitations importantes qui dépassent les mille millimètres (soit 1067,4 mm enregistrée dans la station de Bordj El Amir Khaled et 1042,6 mm enregistré au niveau de la station Tarik Ibn Ziad). Tandis que, les valeurs minimales sont enregistrées au niveau de station de Kherba Ouled Hellal avec une valeur minimal de 14,4(mm).

En plus on peut constater que la partie Est de la région est plus pluvieuse que la partie Ouest. (Une diminution des modules pluviométriques d'Est en Ouest).

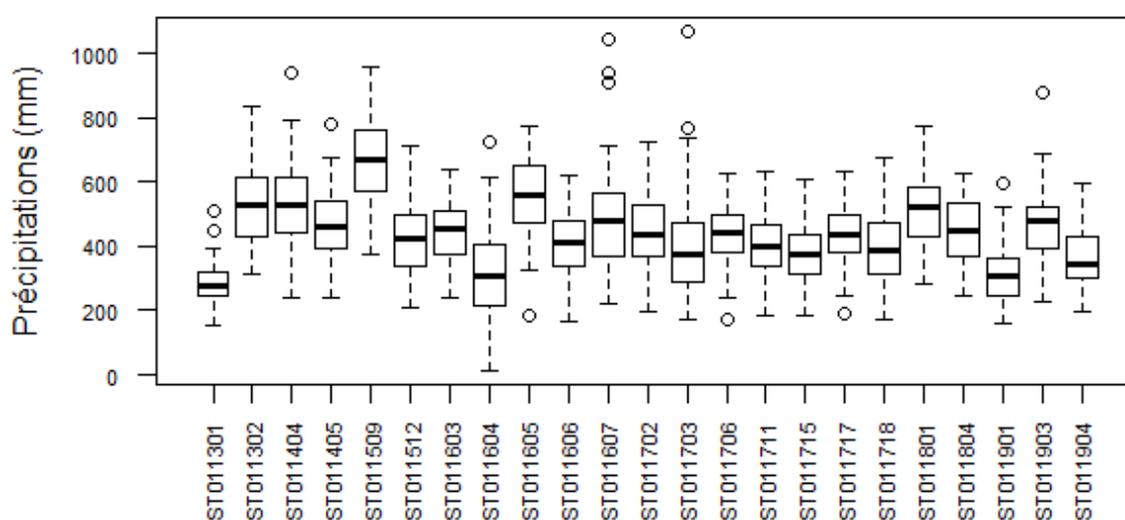


Figure IV-2 : Représentation en box plot de séries pluviométriques.

IV.1.2.2 Tendances des précipitations moyennes annuelles

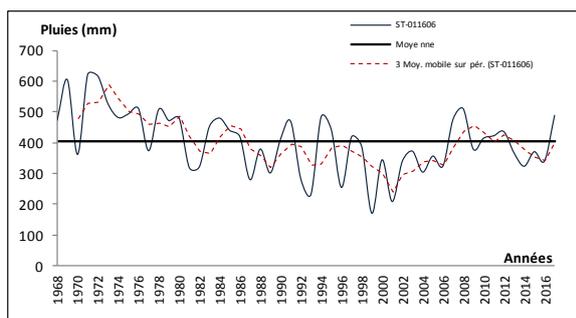
Les séries pluviométriques se caractérisent fréquemment par des effectifs faibles, et ne répondent que rarement aux conditions requises pour l'application de tests statistiques dont certains sont paramétriques. Les tests non paramétriques ne font pas d'hypothèse sur la nature de la distribution de probabilité de la variable définissant la série des observations.

Nous espérons de mettre dans ce travail en évidence l'évolution du régime pluviométrique de la région du Haut Chélif à partir des précipitations, par l'analyse des tendances des séries chronologiques. Ceci en appliquons les méthodes statistiques citées dans le chapitre précédent a fin de caractérisée les tendances générale de la pluviométrie et la détermination de l'année de rupture dans les séries pluviométrique.

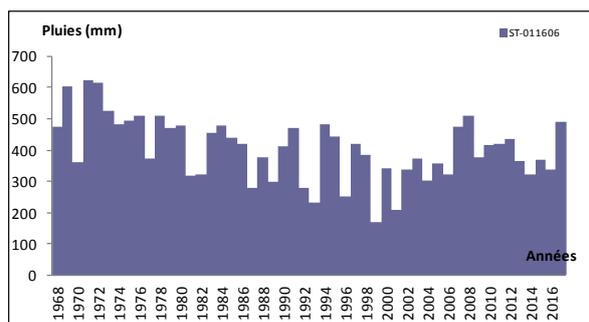
L'analyse des tendances a été réalisée sur les valeurs des précipitations annuelles enregistrées sur une période de 49 ans allant de 1968 à 2017 (Figure IV-3 et Annexe IV-1). Un filtre de moyennes mobiles sur trois (3) ans a été appliqué afin de mettre en évidence les principales tendances.

Les filtres des moyennes mobile réalisée sur l'ensemble des stations de la région d'étude, montrent qu'il y a des années pluvieuses et d'autres moins pluvieuses. Les années moins pluvieuses deviennent de plus en plus fréquentes dès le début des années quatre vingt (1980). De ce fait, la pluviométrie annuelle connaît une nette tendance vers la baisse.

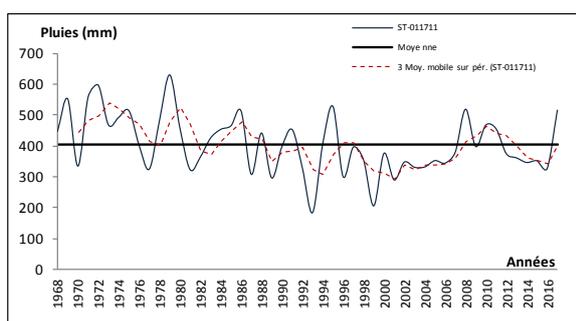
Les courbes de tendance de la moyenne mobile obtenues, indiquent une diminution progressive des quantités de pluies. Cette diminution devient de plus en plus sévère et atteignent des valeurs au dessous de la normale à partir des années quatre vingt dix (1990). Cela nous permet de distinguer deux périodes bien distinctes, une première humide s'étalant entre de 1968 à 1990, et une deuxième période sèche allant de 1991 à 2017 (Figure IV-3 et Annexe IV-1).



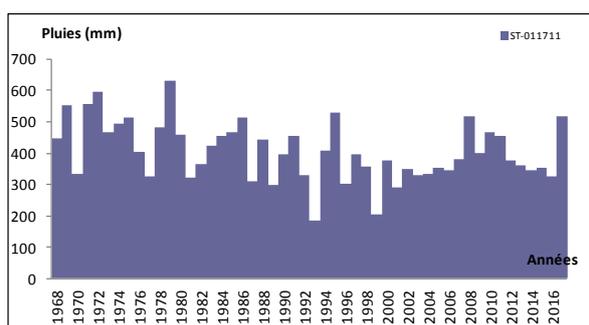
Station 011606



Station 011606



Station 011711



Station 011711

Figure IV-3 : Variation annuelle de précipitation (mm) au cours de la période (1968-2017).

IV.1.2.3 Analyse de rupture dans les séries pluviométriques

La méthodologie employée ici, consiste principalement à détecter les dates de ruptures aux seins des séries de précipitations annuelles retenues pour l'étude, ensuite la mise en évidence du changement climatique par l'estimation de la baisse ou la hausse des précipitations traduite par les écarts par rapport a la moyenne avant ou après la rupture.

En effet, la détection d'une ou plusieurs ruptures renseigne sur l'évolution pluviométrique dans la région donnée. Cette rupture peut être considérée comme étant due à un changement des paramètres de la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisateurs successives constituent les séries chronologiques étudiée.

Pour mettre en évidence le caractère stationnaire ou non des séries chronologiques des précipitations de la région du Haut Chélif, on a utilisé les tests statistiques évoquer dans la partie précédente, portant l'analyse de tendance et de rupture en moyenne (Figure IV-4).

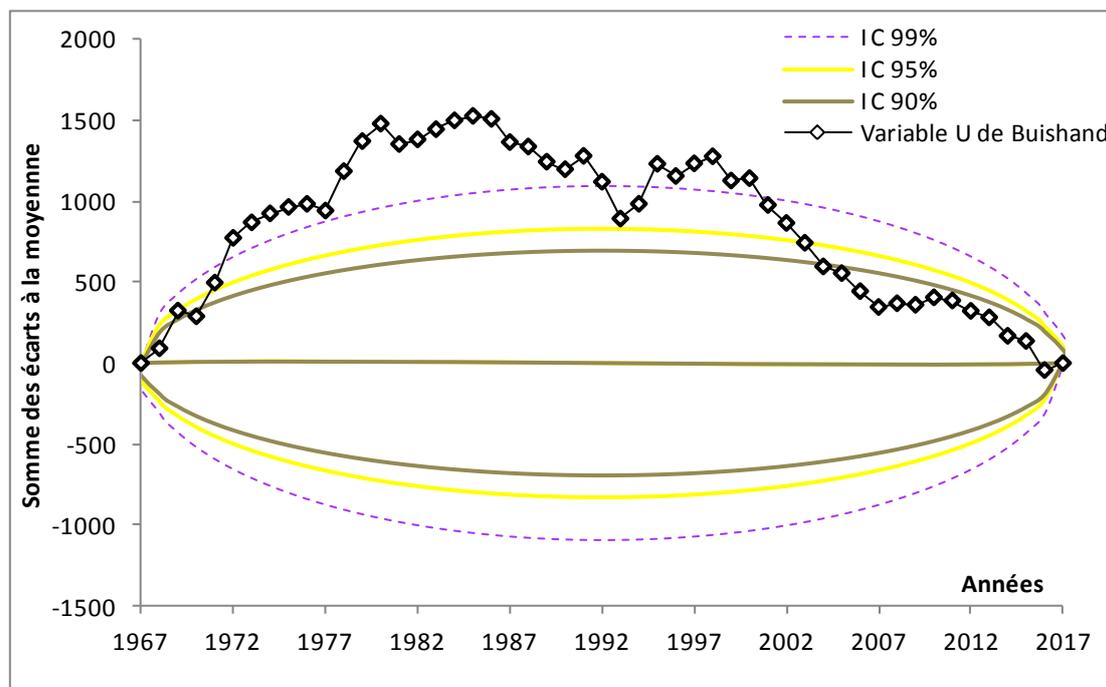


Figure IV-4 : Exemple de l'ellipse de contrôle du test de Buishand (Station 011507)

Outre, le nombre de stations pluviométriques présentant de longues séries d'observations et peu de lacunes est très faible, De ce fait, sur les échantillons disponibles pour notre étude seulement 23 stations font objet de détection de rupture dans les séries chronologiques, sur la période d'observation allant de 1968 à 2017. Les résultats obtenus sont d'autant plus significatifs que la période étudiée est longue.

Les tests ont donné des résultats différents pour certaines stations et une certaine concordance pour le reste (Figure IV-5, Annexe IV-2). Pour la majorité des stations, les différents tests montrent clairement que la rupture s'est produite durant la décennie 1970-80 et c'est donc là que la baisse du module pluviométrique est devenue une réalité; donc, il faut faire face pour mieux gérer une ressource hydrique sans cesse décroissante face à une demande sans cesse en augmentation.

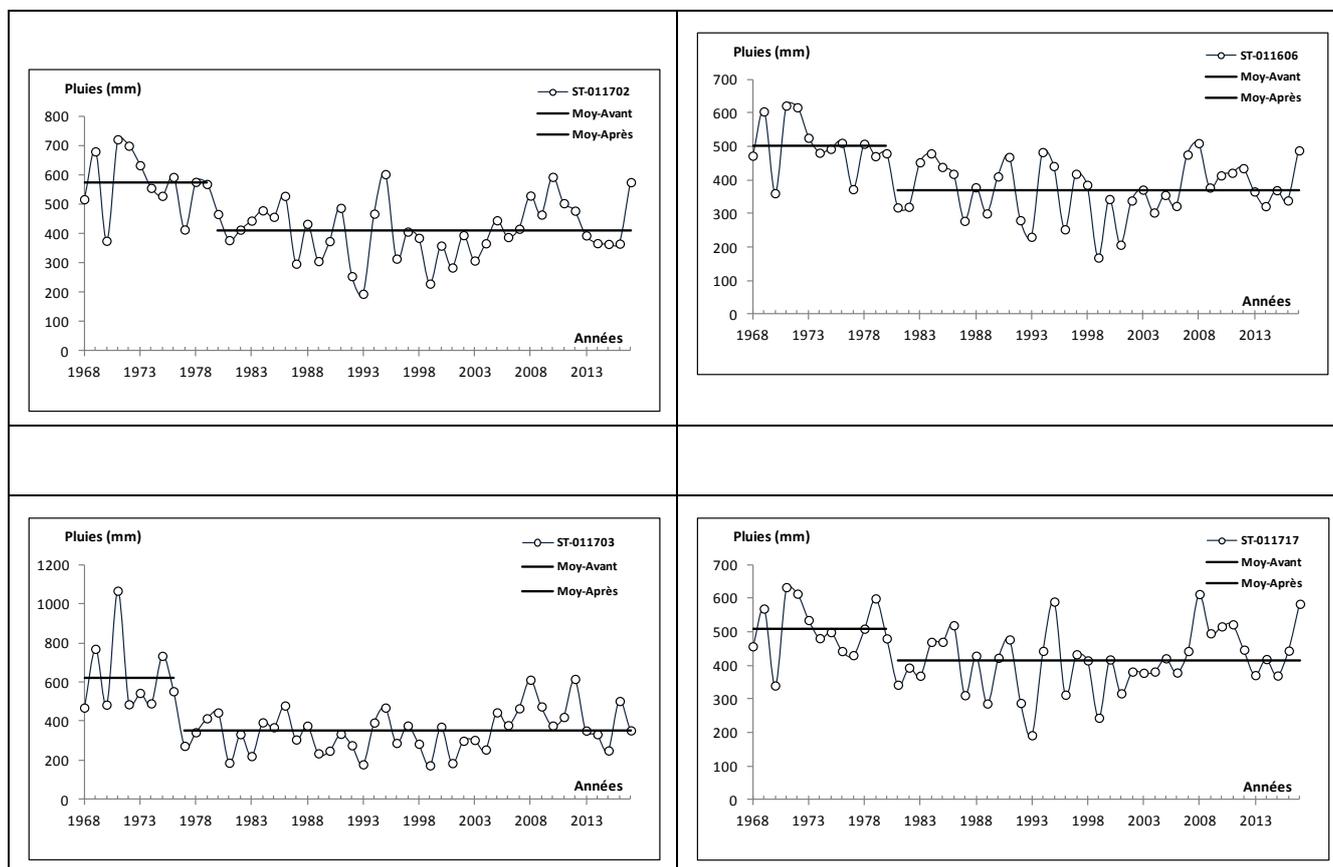


Figure IV-5 : Résultat de la détection de rupture dans les séries pluviométriques.

Ainsi, sur l'ensemble des stations étudiées, 16 stations présentent de rupture de stationnarité durant la période allant de 1968 à 2017 (Tableau IV-2 et Annexe IV-2).

En effet, les résultats d'analyse montrent une stationnarité du régime pluviométrique pour les stations situées dans la zone Sud-Est du bassin du Haut Chéiff (011301, 011302, 011404, 011405, 011509, 011603, 011605) durant la période allant de 1968 à 2017 (Annexe IV-2).

Par contre les stations situées dans la partie centre, Nord et Nord-Ouest présentent dans leur ensemble (01512, 011607, 011606, 011702, 011706, 01711, 011715, 011717, 011718, 011718, 011903, 011904), deux régimes pluviométriques donc une rupture entre 1970 et

1980. Cette variation est marquée par un déficit variant entre 18% et 50% avec une perte allant de 93mm à 242mm (Tableau IV-2).

Tableau IV-2 : Résultats de test de rupture et déficits pluviométrique.

Code	Nom de Station	Moy Avant	Moy Après	Écart	déficits
011301	KSAR EL BOUKHARI GR	280.7	280.7	0	0%
011302	DERRAG	528.3	528.3	0	0%
011404	ZOUBIRIA MONGORNO	530.1	530.1	0	0%
011405	GHRIB BGE	463.9	463.9	0	0%
011507	AIN SULTAN	551.2	397.4	153.8	28%
011509	MEDEA SECTEUR	647.3	647.3	0	0%
011603	BORDJ EL AMIR AEK	440.6	440.6	0	0%
011604	KHERBA OD HELLAL	502.5	286.3	216.2	43%
011605	THENIET EL HAD	547.5	547.5	0	0%
011606	SIDI MOKREFI	501.6	370	131.7	26%
011607	TARIK IBN ZIAD	689.2	446.5	242.7	35%
011702	ARIB CHELIFF	571.8	408.2	163.6	29%
011703	BORDJ EL AMIR KHALED	574.8	456.7	118.1	21%
011706	EL KHEMIS INRA	456.5	228.1	228.3	50%
011711	SIDI LAKHDAR	463.5	370.4	93.1	20%
011715	EL ABABSA	467.8	360.1	107.7	23%
011717	EL KHEMIS ANRH	507.4	414	93.3	18%
011718	HARREZA BGE	497	359.7	137.4	28%
011801	ARIB EBDA	598.4	477.5	120.9	20%
011804	AIN DEFLA	501.5	367.9	133.6	27%
011901	EL TOUAIBIA	414.5	251	163.4	39%
011903	TOUTIA EL HASSANIA	629.9	436.4	193.5	31%
011904	ROUINA MAIRIE	434.7	339.2	95.5	22%

Nous concluons que cette analyse de rupture montre clairement la diminution dans les modules pluviométriques surtout au niveau des stations de la région Ouest du bassin du Haut Chélif.

Cette évolution négative a eu un effet néfaste sur le renouvellement de la ressource en eau de la région du point de vue quantitatif.

IV.1.2.4 Analyse des indices pluviométriques standardisés (SPI)

Les résultats obtenus lors de l'estimation de l'indice pluviométrique standardisé SPI sur douze (12) mois (Annexes IV-3), ont permis de caractériser les années humides et les années sèches qu'a vécues la région d'étude depuis les années quatre vingt. Ces résultats

présentent l'évolution des valeurs moyennes annuelles de l'indice SPI pour différents stations pluviométriques sur la période 1968-2017.

Sur les années soixante dix et le début des années quatre vingt, on trouve partout, de nombreuses valeurs positives du SPI, souvent supérieures à 0. La pluviométrie devient ensuite presque systématiquement déficitaire jusqu'au début des années 2000. Ce caractère déficitaire est particulièrement marqué au cours de la décennie 1990 (Figure IV-6), dont les valeurs prises par le SPI indiquent que ces années sont modérément à extrêmement sèches. Tandis que les valeurs de l'indice descendent en dessous de -1, vers la fin de la période d'observation d'où la pluviométrie reste déficitaire, mais les valeurs de l'indice descendent rarement en dessous de -1 indiquant quelque années modérément sèche. Tandis que les valeurs positives sont généralement les plus fréquentes.

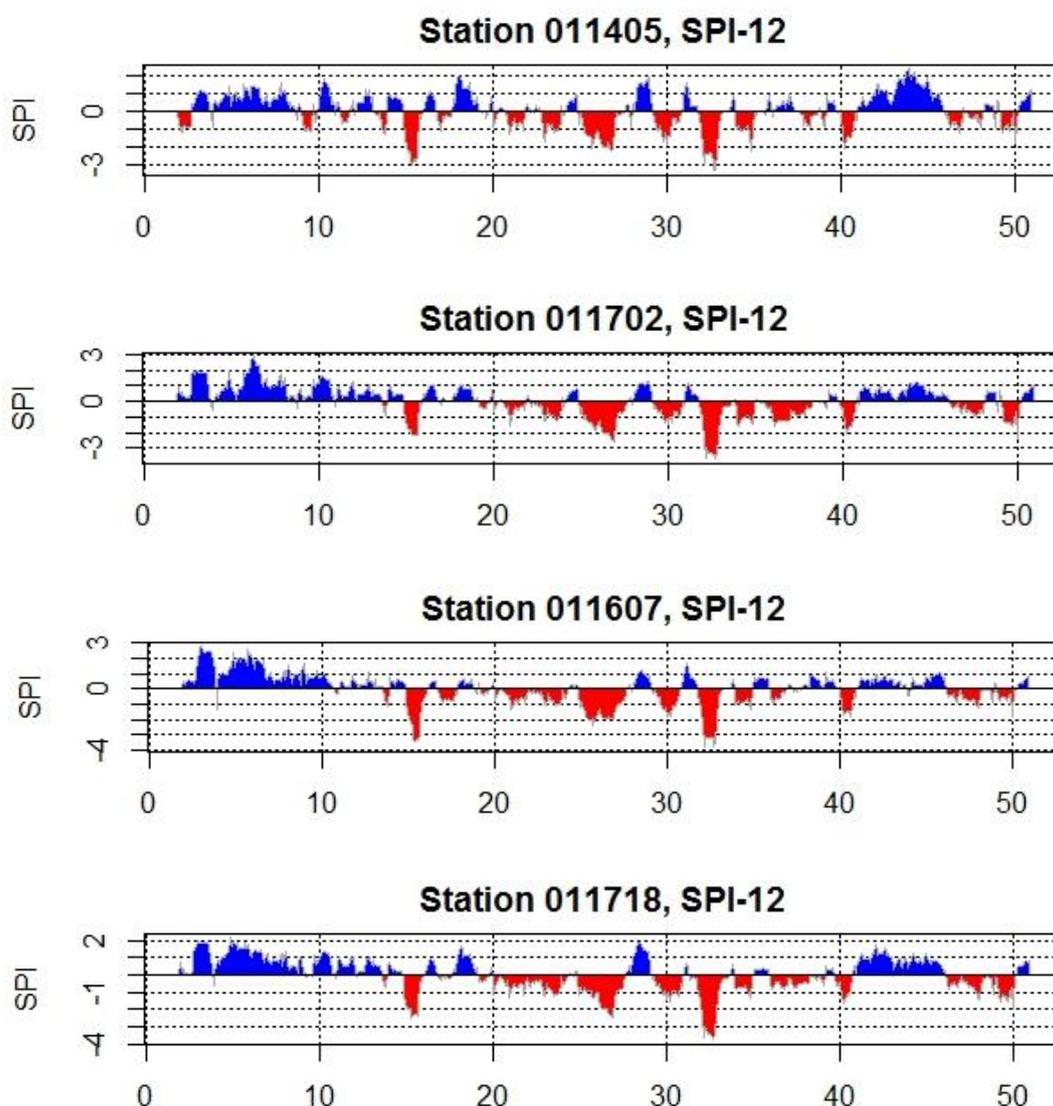


Figure IV-6 : Évolution de l'indice pluviométrique standardisé (SPI-12 Mois, 1968-2017).

IV.2 Évolution et tendance du niveau de la profondeur de la nappe

Le niveau des nappes ou piézométrie dépend des conditions climatiques et des types d'aquifères. Les pluies sont plus ou moins efficaces pour la recharge des nappes ; leur efficacité dépend de la pluviométrie et de la répartition des pluies pendant l'année. La recharge des nappes a lieu en général entre les mois d'octobre et de mars, lorsque l'évapotranspiration est faible. La sécheresse des dernières décennies explique le niveau relativement bas des nappes souterraines mesuré pendant cette période par la plupart des piézomètres. Également, Les prélèvements d'eau souterraine pour les besoins de la population peuvent influencer le niveau des nappes. Cette situation se rencontre notamment lorsque la ressource est peu abondante, comme dans le bassin du Haut Chéouli ou les régions à caractères aride à semi aride.

De ce fait une analyse détaillée des niveaux piézométriques serait nécessaire, afin de mettre en évidence les correspondances existantes entre l'évolution des hauteurs de pluies et les niveaux piézométriques.

IV.2.1 Analyse exploratoire des données piézométriques

Avant traitement, il est nécessaire de faire une exploration détaillée des données existantes pour conduire à une interpolation qui soit la plus représentative du phénomène étudié. L'analyse exploratoire des données permet de visualiser et d'analyser les données disponibles et leur évolution dans le temps et dans l'espace.

Il est ici rappelé que la variable d'intérêt étudiée est la cote piézométrique du système aquifère alluvionnaire du bassin du Haut Chéouli, issue d'une série de campagnes de mesure effectuées de puis septembre 1988 à septembre 2015 sur l'ensemble des piézomètres de la zone d'étude.

Le niveau piézométrique correspond au niveau atteint par l'eau d'une nappe souterraine en un point et à un instant donné. La piézométrie, quant à elle, est la mesure de la profondeur de la surface de la nappe.

Une carte piézométrique est une carte qui permet de visualiser les niveaux d'eau dans le sous-sol. Ces niveaux sont représentés par des courbes d'égale altitude, ou hydro isohypses, qui rejoignent les niveaux piézométriques identiques ; elles sont tracées grâce à des méthodes d'interpolations intégrées dans les outils Spatial analyste et 3D analyst d'ArcGis. Une carte piézométrique est donc une représentation spatiale des niveaux piézométriques.

IV.2.2 Évolution spatio-temporelle des niveaux piézométriques

Le suivi de l'évolution piézométrique de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques. Ces derniers nous renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges géochimiques entre l'eau et la roche.

Dans le cadre de cette étude et pour suivre les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe alluviale du Haut Chélif, on se propose d'analyser et d'interpréter les données piézométriques relatives aux différents périodes et campagnes de mesures.

IV.2.2.1 Analyse de variation des niveaux piézométriques des hautes eaux

L'observation de la morphologie des cartes piézométriques des hautes eaux (figure IV-7, 8 et 9) permet de constater que :

- L'axe de drainage des eaux souterraines, en général, suivant une direction d'Est vers l'Ouest, et coïncide sensiblement avec le parcours de l'Oued Chélif qui draine des eaux de surface.
- L'écoulement des eaux de la nappe du Haut Chélif convergent vers l'axe du synclinale de ce dernier, dont l'axe principal suit le cours de l'Oued Chélif.
- La partie Est (Djendel) et Sud-Ouest (Djelida) de la nappe présente des gradients beaucoup plus forts, où les courbes hydroisohypes sont bien plus resserrées. Dans la zone centrale, les courbes se trouvent espacées traduisent un gradient hydraulique faible. Cette variation du gradient hydraulique peut être due, essentiellement, à l'hétérogénéité de la lithologie de la zone d'étude.
- Présence des zones de dépression en 2002 au point d'eau W84-57 situé au Centre, W84-80 situé à l'Ouest, en 2005 aux points d'eau ; W84-185, W84-5 situés au Centre de la plaine et au point W84-84 situé au Centre pour la campagne d'avril 2015.

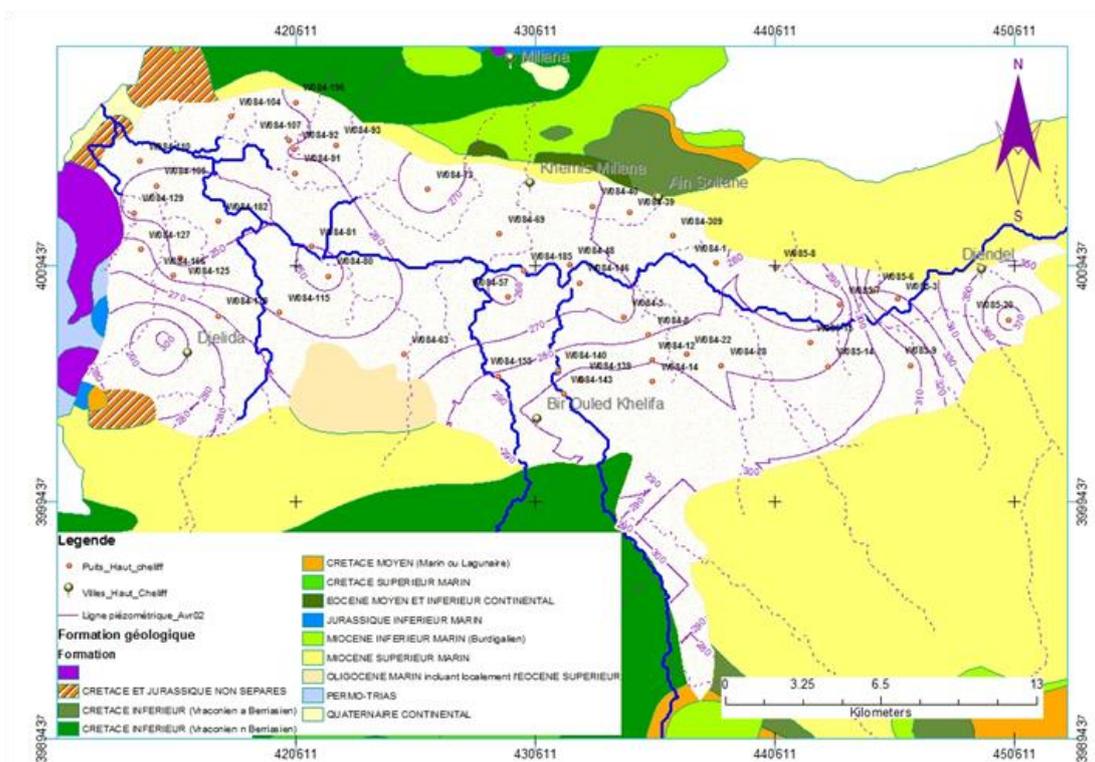


Figure IV-7 : Carte piézométrique des Hautes eaux pour la campagne Avril 2002.

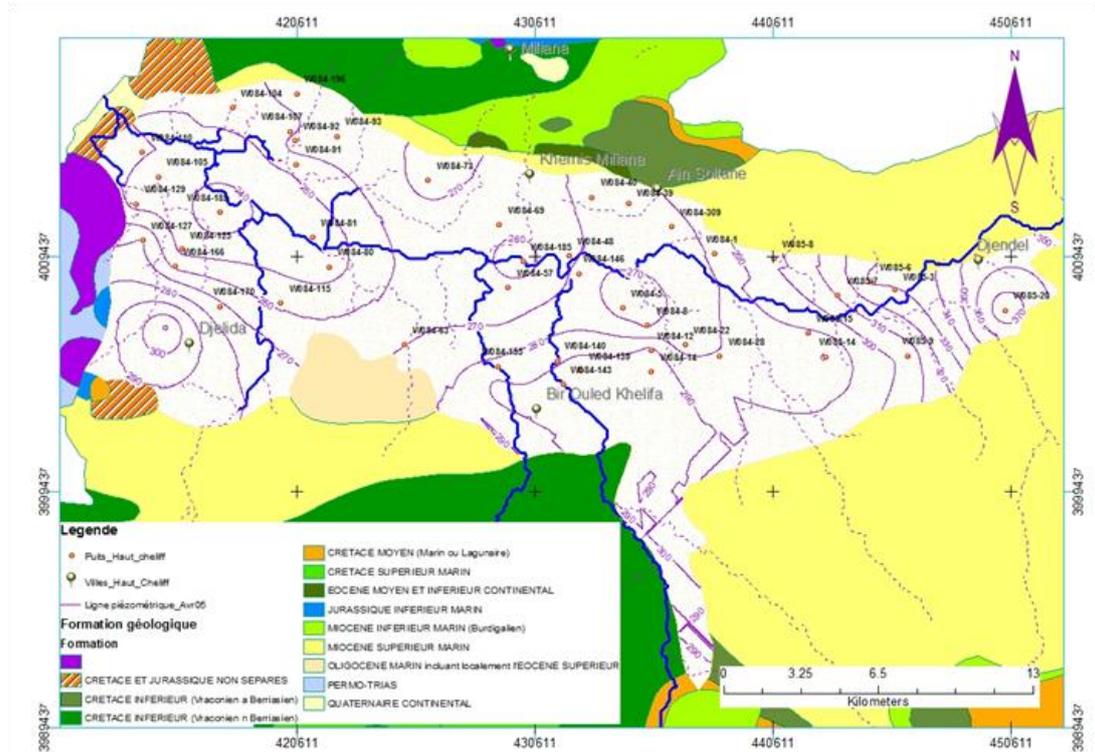


Figure IV-8 : Carte piézométrique des Hautes eaux pour la campagne Avril 2005.

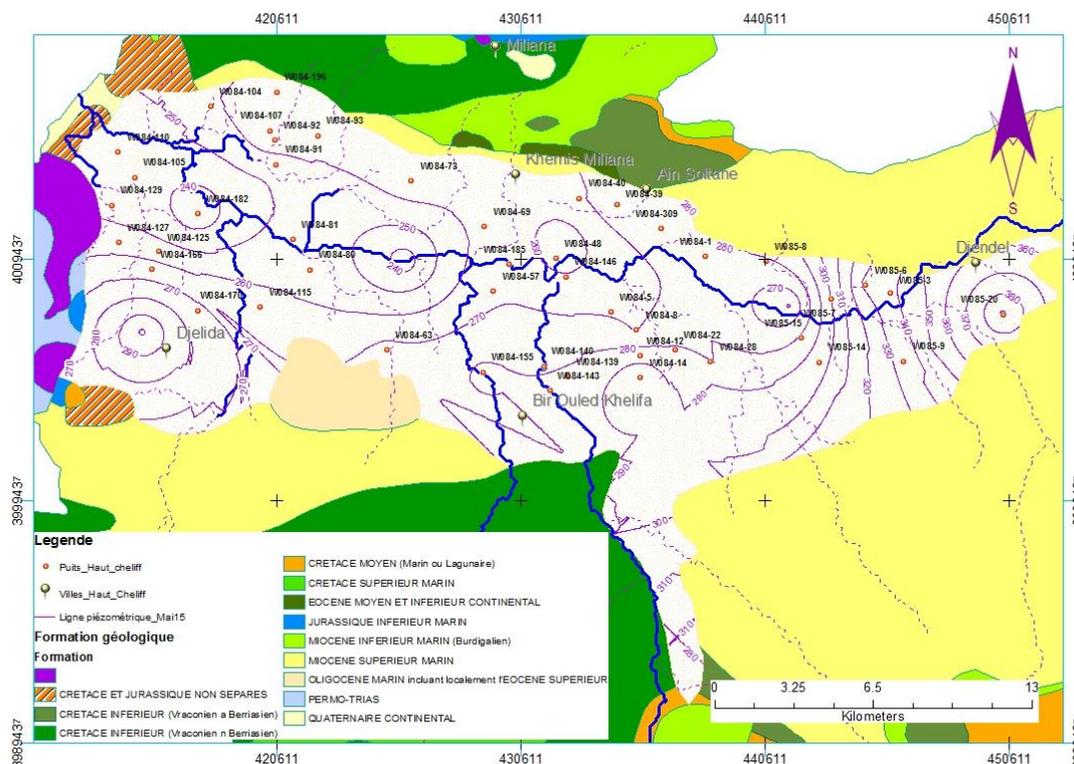


Figure IV-9 : Carte piézométrique des Hautes eaux pour la campagne de Mai 2015.

IV.2.2.2 Analyse de variation des niveaux piézométriques des basses eaux

L'examen des cartes piézométriques des basses eaux ne révèle aucun changement dans la morphologie des niveaux piézométriques par rapport aux cartes des hautes eaux, traduisant ainsi le même sens d'écoulement (figure IV-10, 11 et 12). On note toute fois, une diminution du niveau piézométrique due essentiellement à la faible recharge de la nappe.

- De même l'axe de drainage des eaux souterraines coïncide sensiblement avec le parcours de l'Oued Chéloff.
- Dans la zone Est (Djendel) et Sud-Ouest (Djelida) de la nappe, les courbes hydroisohypses sont resserrées, indiquant un gradient hydraulique fort. Dans la zone centrale, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique faible. Cette variation du gradient hydraulique est due essentiellement, à l'hétérogénéité de la lithologie, donc de la perméabilité.
- On observe aussi une exploitation importante où le niveau piézométrique présente une diminution brutale due à l'effet du pompage durant la période de basses eaux. Cette baisse du niveau piézométrique a été enregistrée durant la campagne des basses eaux de septembre 2003 au niveau des points d'eau, W84-73 (situé au Nord), W84-185 (situé au Centre) et W084-105 (situé à l'Ouest). En effet, cette baisse a été enregistrée

aussi ces dernières années (2013, 2014 et 2015) surtout au niveau des points d'eau Pz1 (situé à l'Est), Pz3, W84-155 (situé au Centre) et Pz4 (situé à l'Ouest).

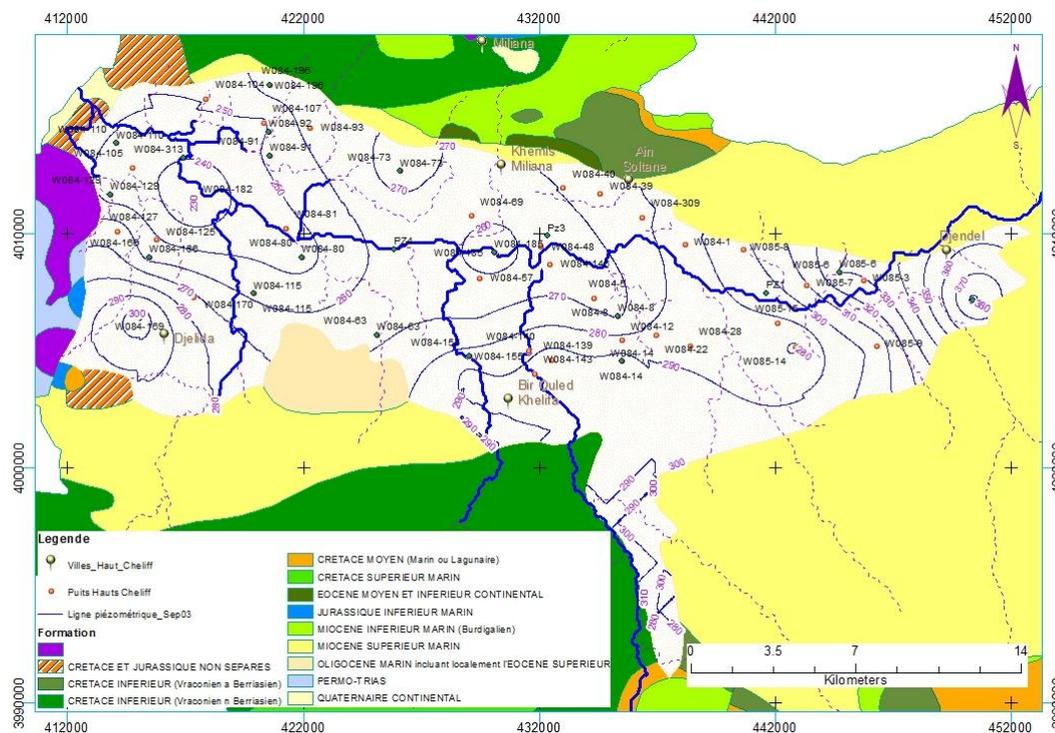


Figure IV-10 : Carte piézométrique des Basses eaux (Compagne de septembre 2003).

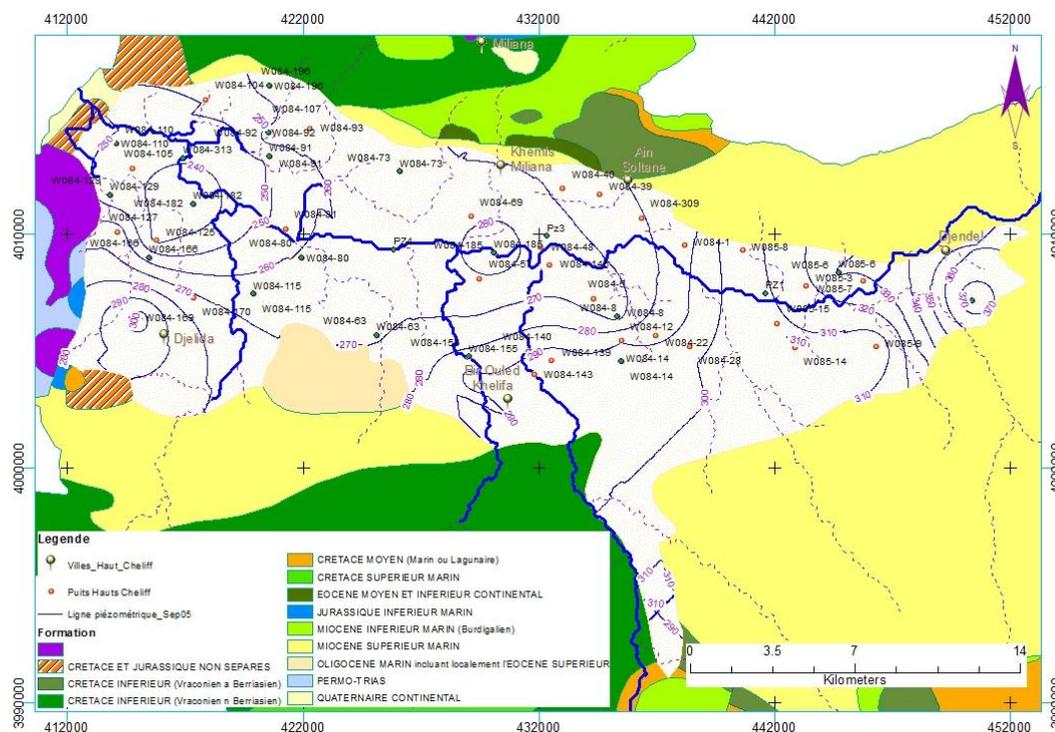


Figure IV-11 : Carte piézométrique des Basses eaux (Compagne de septembre 2005)

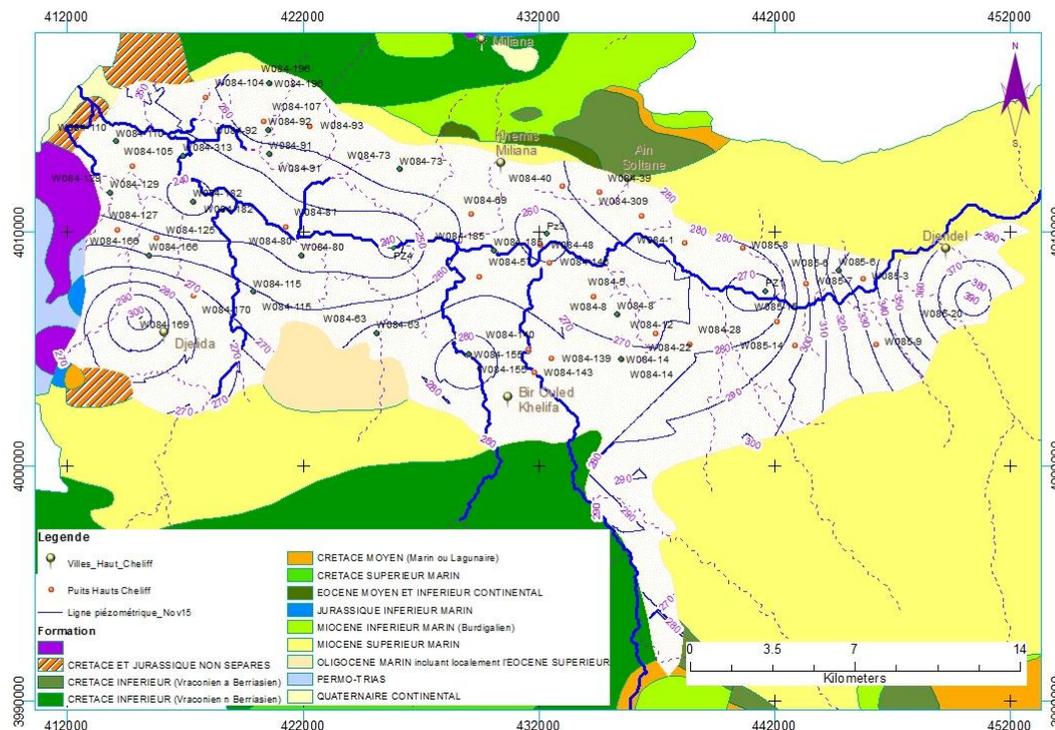


Figure IV-12 : Carte piézométrique des Basses eaux (Compagne de septembre 2015).

IV.2.2.3 Analyse des niveaux piézométriques à travers les profils

Afin de mieux cerner l'évolution et la fluctuation du niveau de la nappe, une autre procédure a été suivie en se basant sur le tracé des profils des niveaux piézométrique à travers la nappe objet de cette étude. Le choix du tracé de ces profils a été menu de façon à avoir le maximum de piézomètres en touchant d'une manière générale la morphologie de la nappe en allant de l'Est en Ouest c'est-à-dire de l'amont vers l'aval.

Ainsi, le tracé AB a été choisie pour la réalisation des différents profils relatifs aux différentes compagnes piézométriques (Figure IV-13).

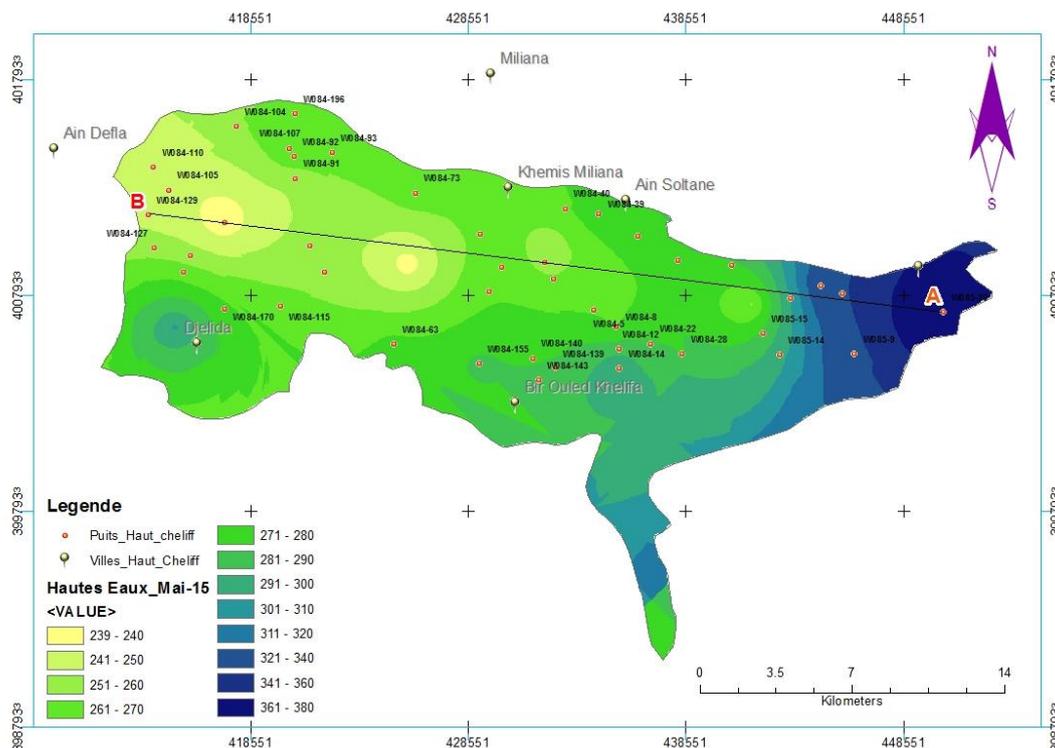


Figure IV-13 : Tracé des profils piézométriques.

Pour illustrer l'évolution dans l'espace et dans le temps du niveau piézométrique au cours de ces dernières années nous avons utilisé des profils des niveaux piézométriques qui ont été réalisés pour différents horizons (Figure IV-14).

Les observations effectuées sur tous les piézomètres que se soit pour la période des hautes eaux ou celles des basses eaux, montrent une tendance importante à la baisse du niveau piézométrique jusqu'à 2015 surtout dans la partie centre et Ouest de la région d'étude. Tandis que, dans la partie amont on remarque une légère hausse du niveau qui peut être due à l'effet d'une faible exploitation de la nappe dans cette zone (les points d'eau sont généralement des puits traditionnels et des sources).

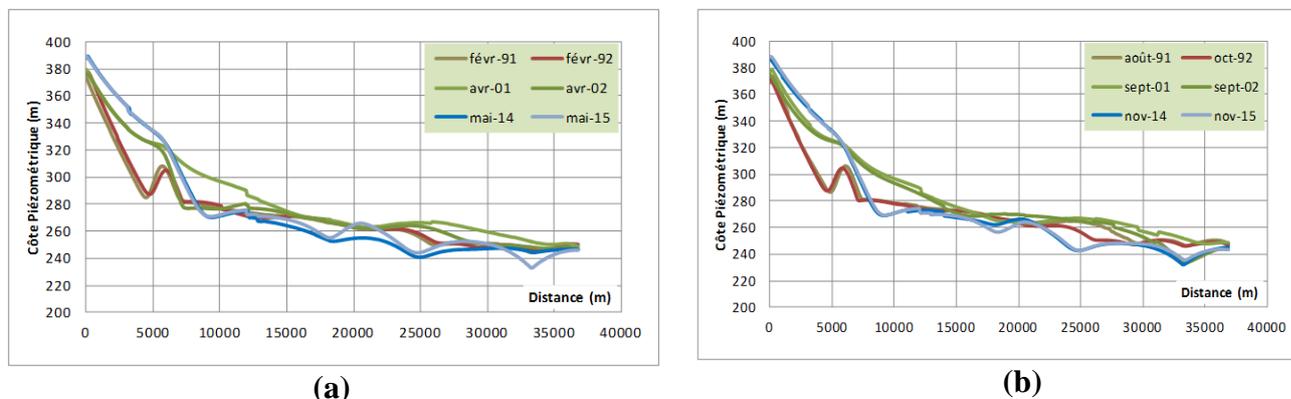


Figure IV-14 : Profils piézométriques ((a)-hautes eaux et (b)- Basses eaux).

IV.2.2.4 Analyse des tendances dans les séries piézométriques

Pour étudier l'impact des changements climatiques sur les niveaux piézométriques de la nappe alluviale du Haut Chéiff, les données de la profondeur de la nappe de chaque point d'eau captant la nappe des alluvions ont été analysé a fin de mettre en confrontation l'évolution de ces niveaux piézométrique et les tendances enregistrées dans les séries de précipitations.

Les courbes réalisées a partir des données des niveaux piézométriques, ont été analysées à l'aide de moyennes mobiles de 3 ans. Quelques exemples sont commentés ci-dessous.

1) Niveaux piézométriques des hautes eaux

Le piézomètre W084-107, situé dans la partie Nord Ouest de la plaine du Haut Chéiff, capte les formations alluvionnaires du quaternaire (Figure IV-15-a). La courbe fait ressortir que la surface piézométrique de la nappe a baissé de 4.0 m environ sur toute la période d'observation. Avant 1993 des potentiels positifs sont observés dans ce piézomètre. Entre 1993 et le début des années 2000 le niveau de la nappe a baissé d'une manière importante, cette diminution du niveau de la nappe est de l'ordre de 6 m. Cette baisse est le résultat de l'effet conjugué de la sécheresse enregistrée surtout dans cette période et de l'exploitation excessive des eaux de la nappe. La succession d'années déficitaires a provoqué une surexploitation des eaux de cette nappe. Cette baisse a s'est prolongée progressivement jusqu'au début des années 2000.

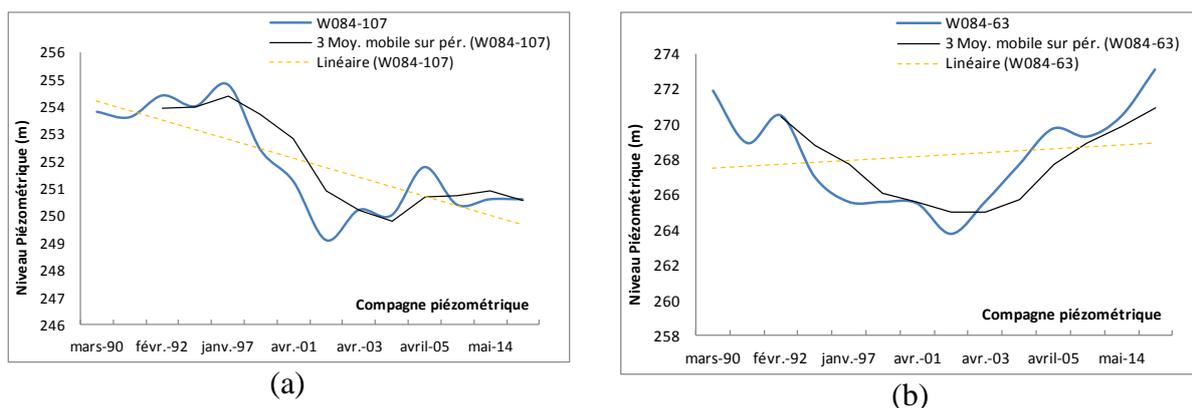


Figure IV-15 : Évolution des tendances dans les niveaux piézométriques.

La courbe de tendance des niveaux piézométriques établie sur la base des données du piézomètre W084-196 située au Sud de la zone d'étude, fait ressortir que la surface piézométrique de la nappe a baissé jusqu'à 8.0 m environ durant la période allant de 1990 jusqu'au début des années 2000.

Tandis que au de la des années 2000 le niveau de la nappe a accusé une remontée de plus de 8.0 m. Elle est due aux pluies importantes qu'à connu la région durant cette période.

2) Niveaux piézométriques des basses eaux

En ce qui concerne les basses eaux, la succession d'années déficitaires enregistrée dans la région d'étude a provoqué une baisse des niveaux de la nappe. Cette baisse a s'est prolongée progressivement jusqu'au début des années 2000.

Le piézomètre W084-8, situé dans la partie centre Est de la plaine du Haut Chélif (Figure IV-16-a). La courbe relative a ce piézomètre, fait ressortir que la surface piézométrique de la nappe a baissé de 8.0 m environ sur toute la période d'observation. Des potentiels positifs sont observés dans ce piézomètre au début des années 1990.

La courbe de tendance des niveaux piézométriques réalisée sur les données du piézomètre W084-39 située au Nord de la zone d'étude, fait ressortir que la surface piézométrique de la nappe a baissé jusqu'à 6.0 m environ durant la période allant de 1990 jusqu'au début des années 2000. Mais à partir des années 2000 le niveau de la nappe accuse une remontée de plus de 6.0 m.

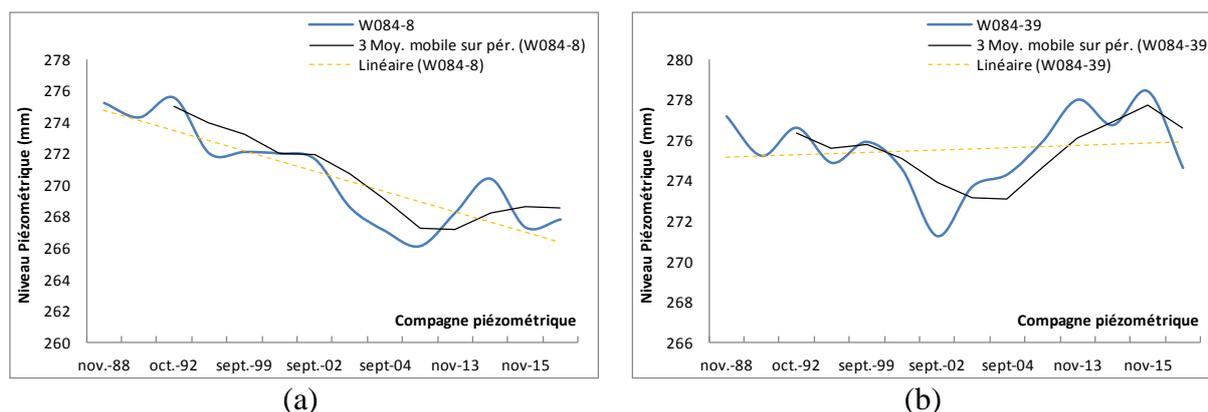


Figure IV-16 : Évolution des niveaux piézométriques des basses eaux.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Au début des années 1970, une série d'événements a fait passer les recherches sur le climat au premier plan de l'actualité, ainsi la communauté scientifique internationale a commencé à s'interroger sur les conséquences possibles de la modification de la composition chimique de l'atmosphère. Ensuite, Les experts scientifiques ont déterminé un phénomène qui ne cesse de prendre de l'ampleur vu le risque qu'il présente pour l'humanité. Ce phénomène est celui du changement climatique ou particulièrement du changement de régime pluviométrique.

Afin d'atteindre cet objectif nous avons jugé nécessaire une étude de la variation des paramètres climatiques tels que la Température, précipitation, évaporation et leur impact sur la fluctuation du niveau piézométrique. Pour cela, différentes méthodes ont été employées.

En effet, avant de commencer l'étude nous avons défini certain concept clé en relation avec le climat et le changement climatique. Ainsi, définir une approche clé pour mené à bien notre travail.

L'approche méthodologique adoptée pour atteindre l'objectif de la présente étude, comporte les opérations suivantes :

- Analyse de la tendance des chroniques des paramètres climatique en utilisant méthode statistique telle que la moyenne mobile.
- La détection de la rupture aux seins des séries pluviométriques annuelles par tests statistiques. Cette rupture se traduise par un changement de loi de probabilité.
- De mettre en évidence l'évolution du climat à l'aide des indices climatiques (indice de précipitation standardisé SPI...).
- La comparaison des résultats obtenus avec l'évolution du niveau piézométrique de la nappe.

Ce pendant, l'analyse des tendances réalisée sur les séries chronologiques enregistrées à travers les stations pluviométriques de la région du Haut Chélif, sur une période de 49 ans allant de 1968 à 2017.

Les filtres de moyennes mobiles sur trois (3) sont appliqués afin de mettre en évidence les principales tendances. Cette méthode a mis en évidence la succession de deux phases, un long épisode globalement pluvieux qui s'est étendu entre le début des années 60 et la fin des années 80, une période globalement déficitaire, qui aurait commencé au début des années 90 et qui persiste jusqu'à nos jours.

Les tests de détection de la rupture au sein des séries pluviométrique, (tests statiques proposés par le logiciel **Khronostat** : la statistique U de Buishand, 1984, le test de

Pettitt, 1979, la méthode bayésienne de Lee et Heghinian, 1977 et la procédure de segmentation d'Hubert, 1997). Les résultats obtenus montrent l'existence d'une rupture de stationnarité dans les données pluviométriques, cette rupture se manifeste généralement vers la fin des années soixante-dix et le début des années quatre-vingt.

L'évolution de l'indice climatique montre la présence d'une variabilité spatio-temporelle des précipitations avec l'existence des périodes des sécheresses surtout pendant la période de 1985 à 2006. Ces années sont modérément à extrêmement sèches.

Outre, l'analyse de la fluctuation des niveaux piézométrique montre que la nappe du Haut Chélif a connu une tendance importante à la baisse du niveau piézométrique jusqu'à 2015 surtout dans la partie Centre et Ouest de région d'étude, Cette baisse, s'explique principalement par la surexploitation des eaux souterraines et aux longs épisodes de sécheresse qui ont été sévi sur la région.

De manière générale, sur l'ensemble des piézomètres examinés, les variations des niveaux piézométriques de la nappe alluviale du Haut Chélif reflètent assez fidèlement les évolutions pluviométriques enregistrées au niveau des stations pluviométriques étudiées, avec un certain décalage dans le temps. La réponse du niveau d'eau de la nappe aux variations climatiques nécessite un délai, dépendant de la conductivité hydraulique et de l'emmagasinement de l'aquifère, et également de la distance entre la zone de recharge et le point d'observation.

Enfin, et au vu de ce qui précède, il s'avère que la sécheresse est un mal qui ne peut être combattu. Il faudrait en revanche la gérer et développer des stratégies pour surmonter ces effets. Ainsi, il est recommandé :

- De revoir la possibilité d'augmenter la fréquence d'observations des niveaux piézométriques (échelle de temps mensuelles au lieu de campagnes chaque six mois), afin d'améliorer l'information sur le niveau de la nappe en nombre et en qualité.
- D'encourager et de promouvoir les responsables, les décideurs et les agences chargées, devaient engager plus d'efforts et mettre dans leur priorités des programmes de développement d'un modèle hydrodynamique du système hydrogéologique du Haut Chélif. Le but est d'actualiser l'évaluation des ressources exploitables de la plaine du Haut Chélif, tenant compte l'évolution climatique et de mettre au point des scénarios de développement d'exploitation future des ressources en eau souterraines dans toute la région.
- De compléter l'analyse hydroclimatique par l'analyse des tendances des paramètres physico-chimiques pour trouver des relations ou d'expliquer l'impact des évolutions hydroclimatiques sur la qualité des eaux souterraine.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

ABDERRAHMANI, BELAI. Les risques climatiques et leurs impacts sur l'environnement. Thèse doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. Faculté de Chimie. Département de Chimie Organique Industrielle. Année de soutenance 2015. Disponible sur < dspace.univ-usto.dz>. Consulté le : 05/01/2016.

ALLEY, W., REILLY, T., FRANKE, O., 1999. Sustainability of ground-water resources. Denver, Colorado.

ANONYME (2009). Problématique du secteur de l'eau et impacts liés au climat en Algérie. PNUD. Algérie, 19 p.

ANONYME, Le mouvement des ONG françaises engagées pour l'accès à l'eau et à l'assainissement pour tous. Eau et changement climatique : note de recherche. 2014. Disponible sur < www.coalitioneau.org >. Consulté le 05/01/2016.

BAGHDADLI, ILYAS. L'influence du changement climatique sur les ressources en eaux du Meffrouch. 74pages. Mémoire master. UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEM. FACULTE DE TECHNOLOGIE. DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE. Année de soutenance 2014. Disponible sur : < dspace.univ-tlemcen.dz>. Consulter le 06/12/2015.

BAKARI S et AL., 2012. Ground water residence time and paleorecharge conditions in the deep confined aquifers of the coastal watershed, South-East Tanzania. *J. Hydrol.* 466-467, 127-140.

BARRON et AL., 2011. Climate change impact on groundwater resources in Australia. *Natl. Water Comm.* 222.

BATES B et AL., 2008: Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le GIEC, Genève, 236p.

CHRISTIAN, GODIN. La totalité, Volume 5. Editions Champ Vallon, 2002 - 954 pages. Disponible sur : < books.google.fr>. Consulter le 06/12/2015.

CLOUTIER, V., et AL., 2009. Desalination of a sedimentary rock aquifer system invaded by Pleistocene Champlain Sea water and processes controlling groundwater geochemistry. *Environ. Earth Sci.* 59, 977-994.

CROSBIE, R.S et AL., 2010. Modelling climate-change impacts on groundwater recharge in the Murray-Darling Basin, Australia. *Hydrogeol. J.* 18, 1639-1656.

DÖLL, P., FIEDLER, K., 2008. Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 863-885.

DRAGONI, W., SUKHIJA, B.S., 2008. Climate change and groundwater: a short review. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 288, 1-12.

- FRANCK, LESPINAS, 2008.** Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse de doctorat. UNIVERSITE DE PERPIGNAN. Disponible sur < cpdp.debatpublic.f>. Consulté le : 14/01/2016.
- GERBER, R.E., HOWARD, K., 2000.** Recharge through a regional till aquitard: Three-dimensional flow model water balance approach. *Ground Water* 38, 410–422.
- GLASSLEY, W.E et AL., 2003.** The impact of climate change on vadose zone pore waters and its implication for long-term monitoring. *Comput. Geosci.* 29, 399–411.
- HELGA-JANE SCARWELL, ISABELLE ROUSSEL.** Le Changement climatique : Quand le climat nous pousse à changer d'ère. Presses Univ. Septentrion, France. 2010 - 358 pages. Disponible sur : < books.google.fr>. Consulter le 06/12/2015.
- JACQUES, DERMAGNE et AL.** Partager la connaissance et ouvrir le dialogue : le changement climatique. 2006. Groupe de réflexion Académies et Conseil économique et social.
- KELLY, B.F.J et AL., 2013.** Aquifer heterogeneity and response time: the challenge for groundwater management. *Crop Pasture Sci.* 1141– 1154.
- KLOPPMANN, W et AL., 2010.** Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer.
- KUNDZEWICZ, Z.W., DÖLL, P., 2009.** Will groundwater ease freshwater stress under climate change? *Hydrol. Sci. J.* 54, 665–675.
- KUMAR, C., 2012.** Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources 1, 43–60.
- LEMER, D.N., ISSAR, A.S., SIMMERS, I., 1990.** Groundwater Recharge, vol. 8 of International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology. Heise, Hannover, West Germany.
- MARGAT, J., FOSTER, S., DROUBI, A., 2006.** Non-Renewable Groundwater Resources. A Guidebook on Socially Sustainable Management for Water Policy Makers, Arid Lands Water Evaluation and Management.
- RANJAN, P., KAZAMA, S., SAWAMOTO, M., 2006.** Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources. *Glob. Environ. Chang.* 16, 388–399.
- SAIDA, NIAZI, 2007.** Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc) : Vulnérabilité et Adaptation. Thèse doctorat. UNIVERSITÉ MOHAMMED V – AGDAL . FACULTÉ DES SCIENCES. Disponible sur < toubkal.imist.m>. Consulté le : 05/01/2016.
- TABEAUD, MARTINE, 2008.** La climatologie générale. 3^{ème} édition. Paris : Armand Colin, 126p.
- TABET, SLIMANE, 2008.** le changement climatique en algerie orientale et sesconsequences sur la vegetation forestiere. mémoire magistère. UNIVERSITÉ MENTOURI CONSTANTINE. faculte des sciences de la nature et de la viedepartement de biologie et d'ecologie. disponible sur < bu.umc.edu.dz>. consulté le :05/01/2016.

VAN VLIET, 2007. Impact of climate change on groundwater review. IGRAC report for TNO Bouw en Ondergrond.

VERNOUX, J.F, 2015. Réseau de référence piézométrique pour le suivi de l'impact du changement climatique sur les eaux souterraines. Rapport final. BRGM/RP-64858-FR, 51 p., 18 fig., 7 tabl., 1 ann.

YIDOUREGA, DIEUDONNÉ BATIONON, 2009. Changements climatiques et cultures maraichères. Mémoire Master. Université d'Ouagadougou, Disponible sur < memoireonline.com>. Consulté le 18/12/2015.

ANNEXES

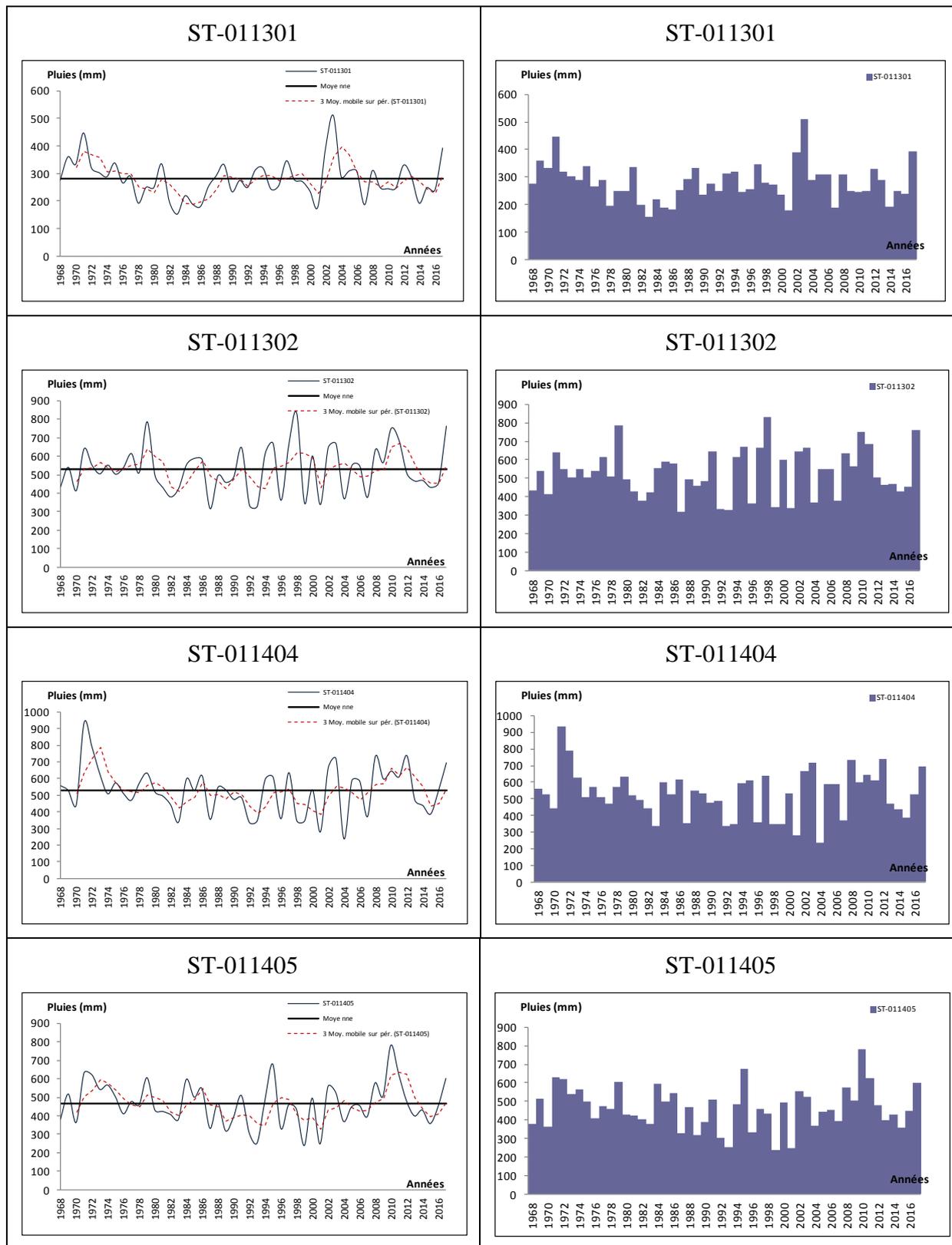
Annexes

Annexe IV-1 : Caractéristiques des points de mesures piézométriques

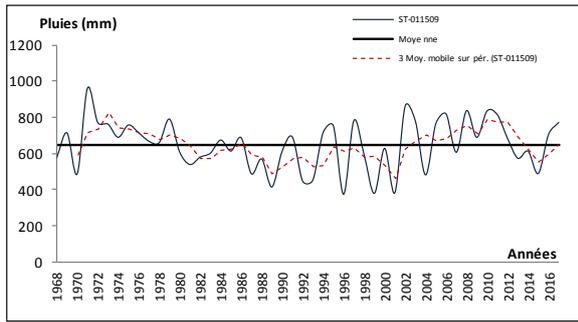
N°	N°BIRH	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof
1	PZ1	468600	323800		50
2	PZ2	466650	320800		60
3	Pz3	459300	326200		50
4	PZ4	452800	325600		50
5	PZ5	423300	332000		50
6	PZ6	420900	329300	230	50
7	W084-1	465120	325850	288.40	22.31
8	W084-104	444800	332000	263.40	22.70
9	W084-105	441700	329050	249.24	11.10
10	W084-107	447250	331000	264.81	17.00
11	W084-110	441000	330100	246.76	12.00
12	W084-111	440400	331800	245.14	9.08
13	W084-114	446250	325250	264.53	15.00
14	W084-115	446850	323700	275.93	19.00
15	W084-12	462450	321750	308.38	21.21
16	W084-125	442700	326000	258.29	20.00
17	W084-127	441050	326350	274.14	16.00
18	W084-129	440750	327900	251.75	8.65
19	W084-131	435700	330250	241.21	17.90
20	W084-134	459460	324220	280.59	17.10
21	W084-136	459100	321900	295.92	15.00
22	W084-139	459500	320900	303.64	11.20
23	W084-14	462470	320850	315.80	25.10
24	W084-140	458500	321300	296.90	14.00
25	W084-143	458750	320300	301.10	16.20
26	W084-146	459400	325000	280.04	15.81
27	W084-154	456400	321850	290.05	13.50
28	W084-155	456000	321050	293.02	12.72
29	W084-166	442400	325250	269.18	12.01
30	W084-169	442050	322650	313.15	16.00
31	W084-170	444300	323550	293.18	12.51
32	W084-182	444300	327550	252.28	8.21
33	W084-185	457050	325500	274.84	13.01
34	W084-196	447500	332600	278.02	19.10
35	W084-22	463900	322000	298.82	26.30
36	W084-28	465350	321520	307.71	33.80
37	W084-309	463300	327000	288.06	18.00

N°	N°BIRH	X (m)	Y (m)	Z (m)	Prof
38	W084-310	456300	322100	289.75	18.00
39	W084-311	455950	320250	310.84	23.00
40	W084-313	443850	329500	250.85	280.00
41	W084-314	454550	328350	279.22	18.00
42	W084-39	461500	328000	292.83	23.11
43	W084-40	459950	328250	287.25	17.95
44	W084-48	459000	325750	279.94	17.40
45	W084-5	461250	323550	287.41	15.69
46	W084-56	456500	324850	275.73	18.20
47	W084-57	456425	324400	275.73	13.92
48	W084-63	452070	321950	280.60	15.00
49	W084-69	456050	327050	274.89	15.01
50	W084-72	454400	328400	279.30	12.59
51	W084-73	453050	328950	277.30	8.50
52	W084-76	451570	326950	263.21	16.50
53	W084-8	462300	322800	293.40	20.66
54	W084-80	448900	325250	260.12	17.00
55	W084-81	448200	326500	258.23	14.50
56	W084-83	449250	328950	262.36	10.00
57	W084-91	447500	329600	256.64	5.50
58	W084-92	447450	330600	284.31	21.10
59	W084-93	449200	330800	286.90	32.41
60	W084-99	443820	329800	251.07	20.00
61	W085-14	469820	321500	316.43	40.10
62	W085-15	469070	322500	303.07	32.50
63	W085-20	477350	323500	394.87	23.20
64	W085-23	480100	322250	475.24	12.42
65	W085-26	484570	321500	364.80	14.00
66	W085-27	483750	322770	359.94	14.00
67	W085-3	472700	324350	314.35	36.77
68	W085-38	480950	322900	514.99	8.50
69	W085-6	471700	324700	346.26	19.50
70	W085-7	470300	324120	306.97	32.58
71	W085-72	484250	321450	358.34	36.10
72	W085-8	467600	325650	306.29	34.50
73	W085-9	473250	321550	333.18	36.00

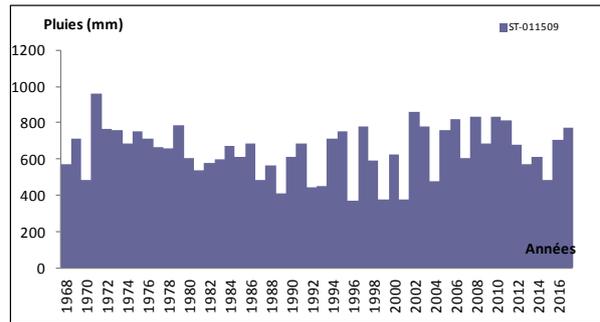
Annexe IV-1 : Évolution des précipitations annuelles



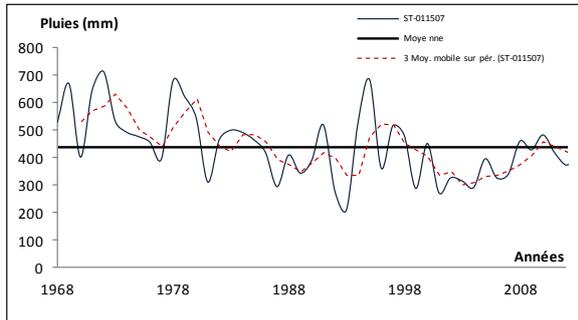
ST-011509



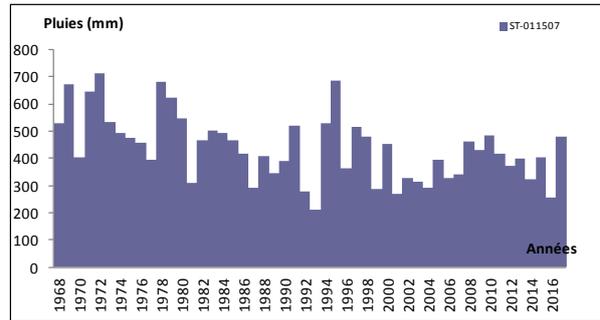
ST-011509



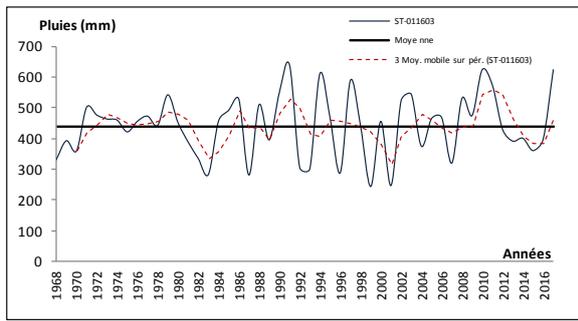
ST-011507



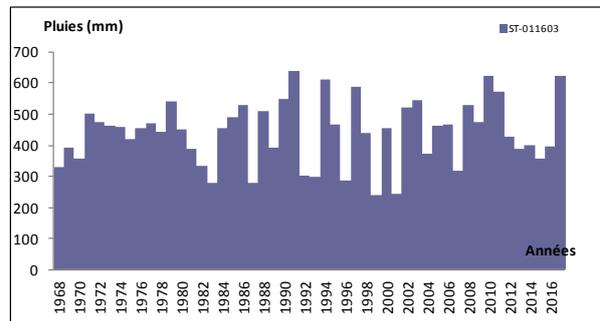
ST-011507



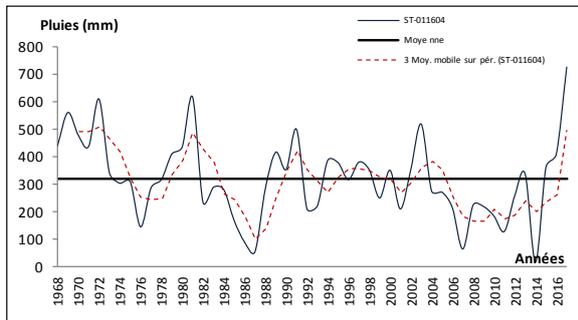
ST-011603



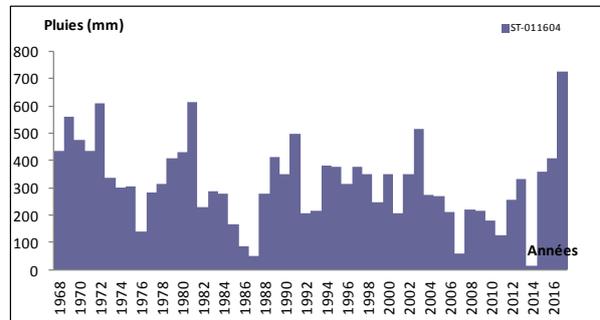
ST-011603



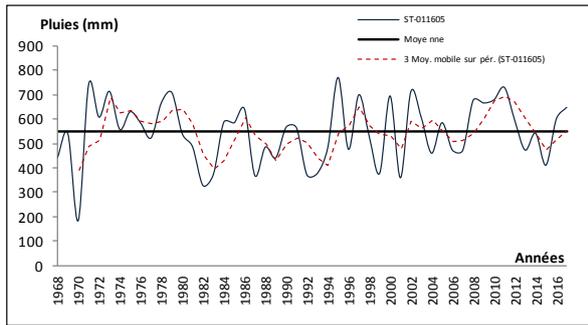
ST-011604



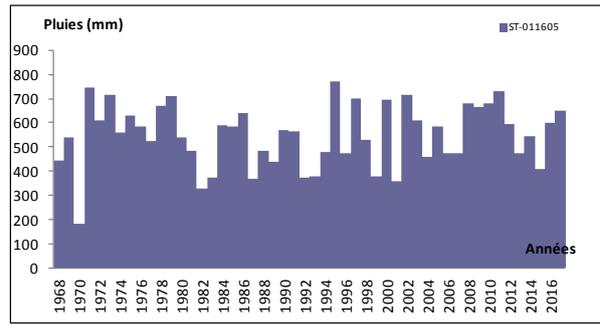
ST-011604



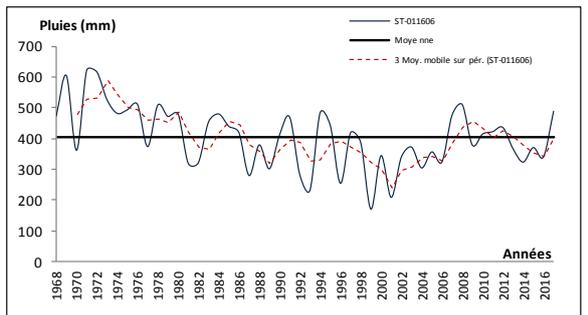
ST-011605



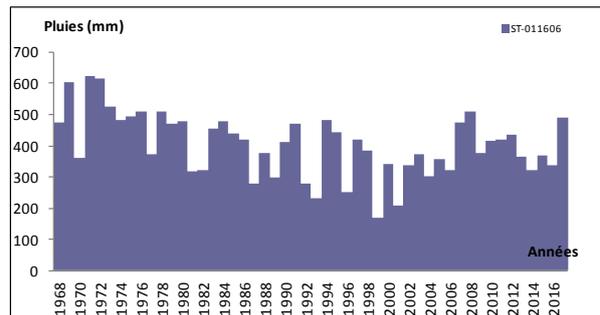
ST-011605



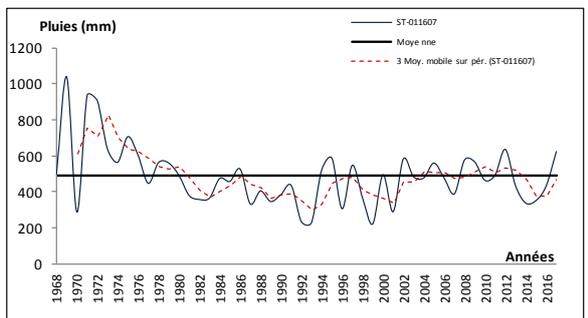
ST-011606



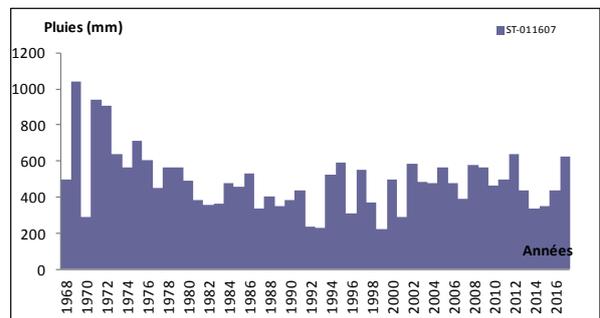
ST-011606



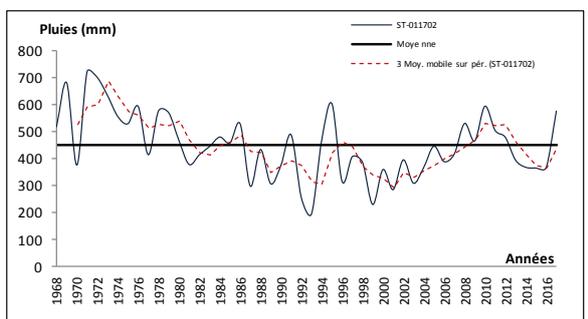
ST-011607



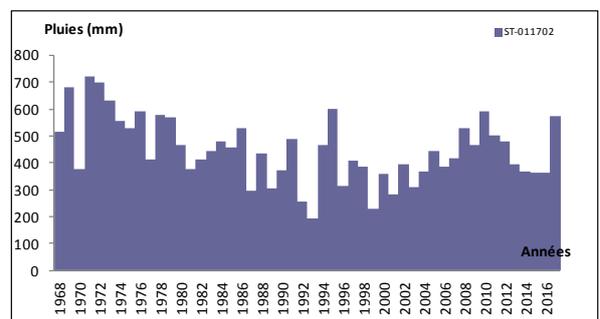
ST-011607



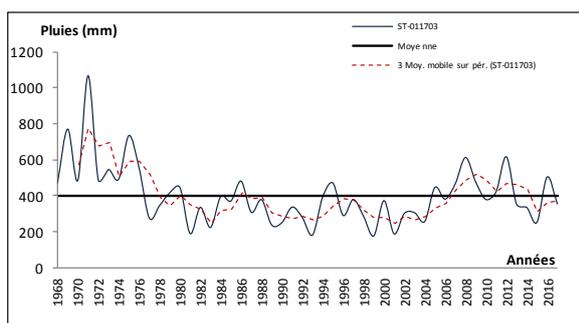
ST-011702



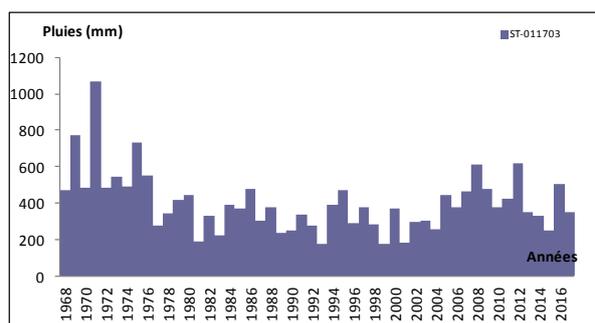
ST-011702



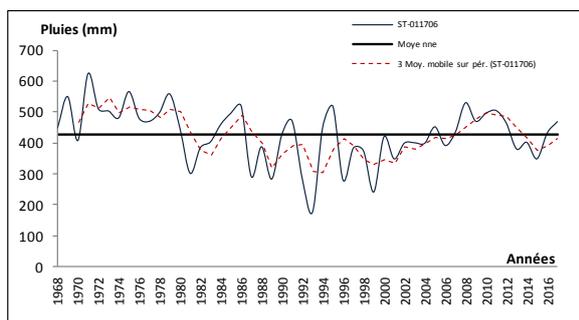
ST-011703



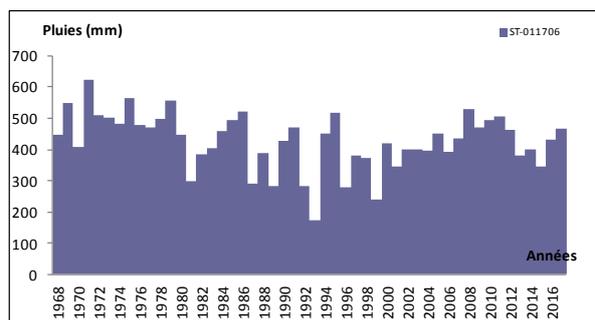
ST-011703



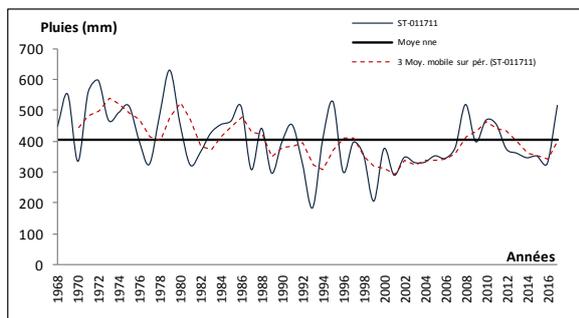
ST-011706



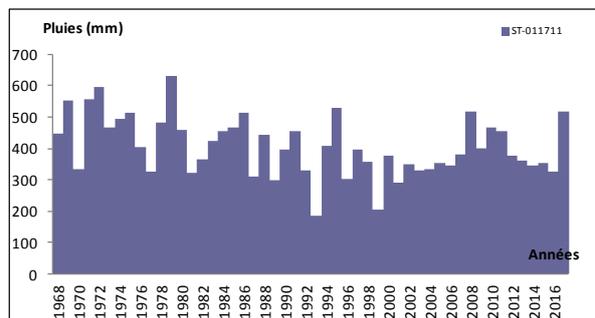
ST-011706



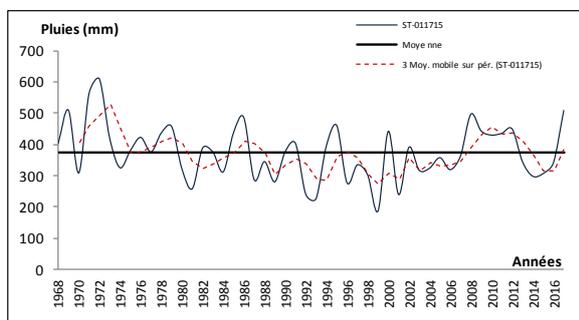
ST-011711



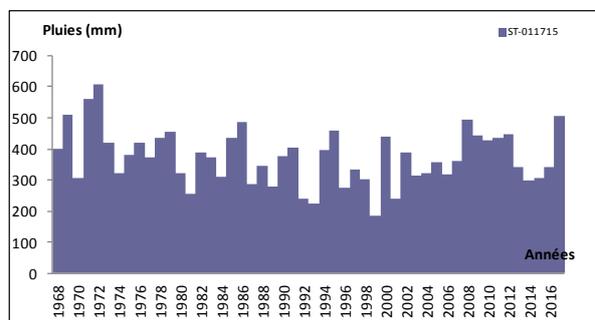
ST-011711



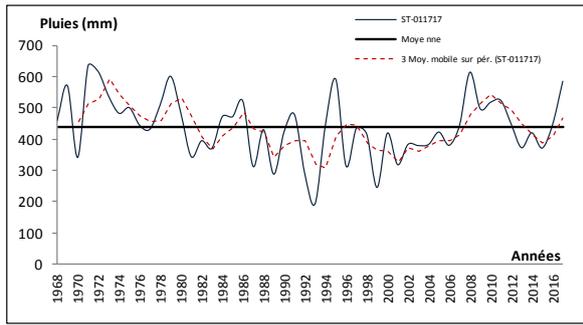
ST-011715



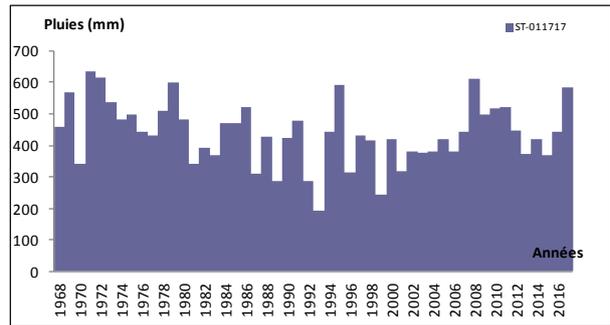
ST-011715



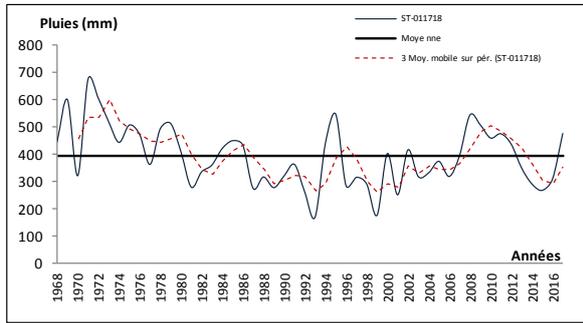
ST-011717



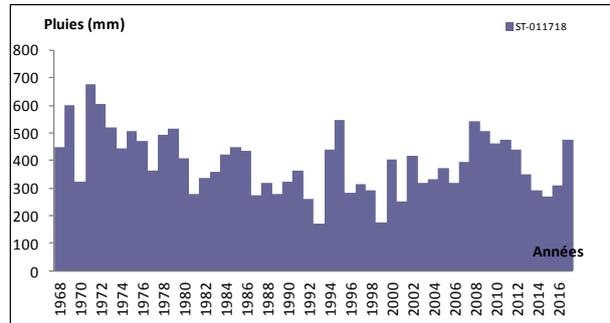
ST-011717



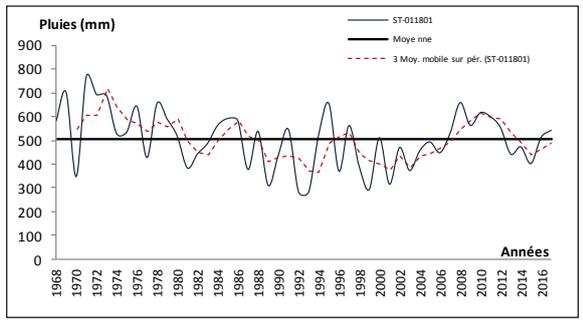
ST-011718



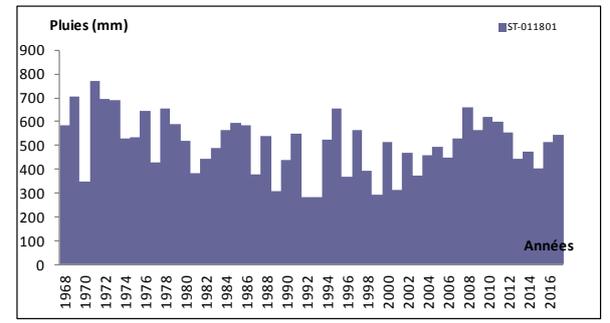
ST-011718



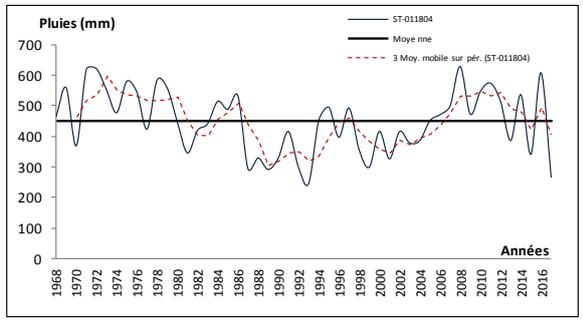
ST-011801



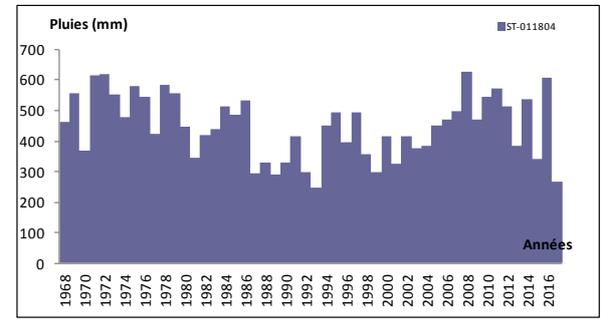
ST-011801



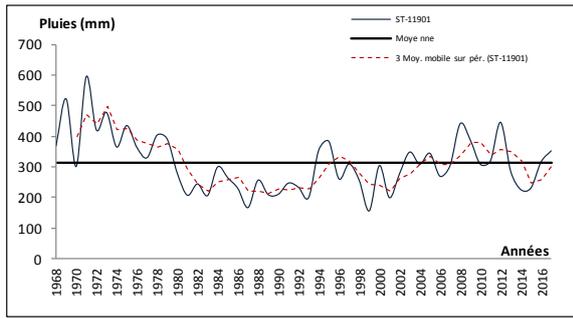
ST-011804



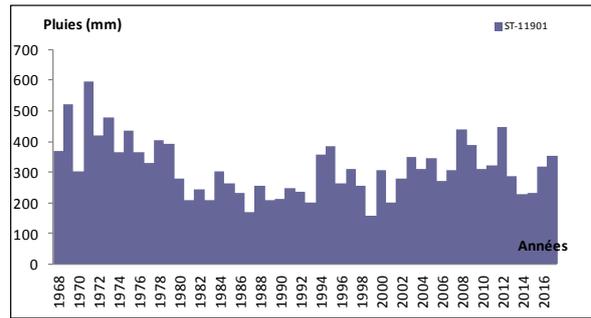
ST-011804



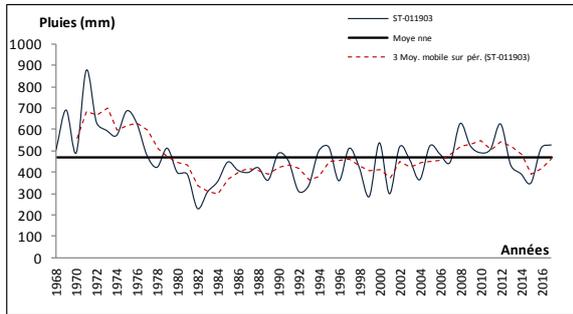
ST-11901



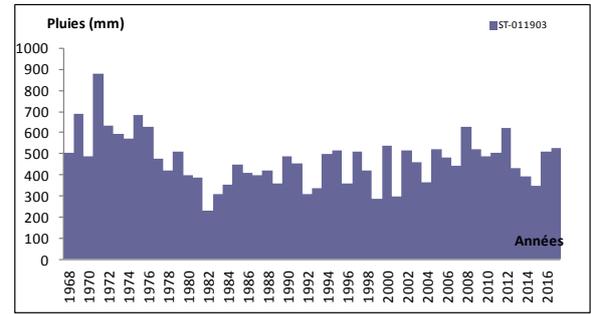
ST-11901



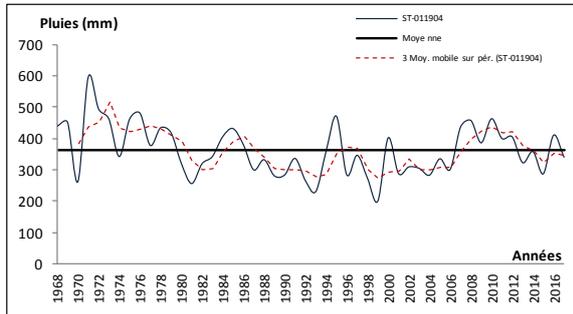
ST-011903



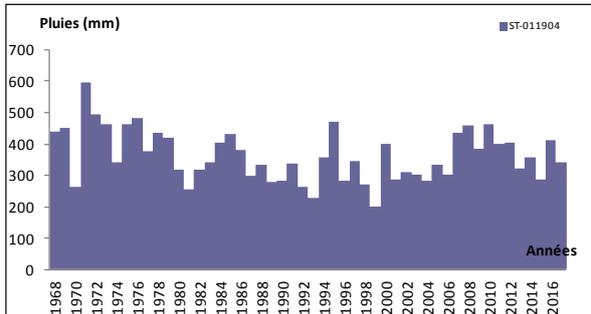
ST-011903



ST-011904



ST-011904



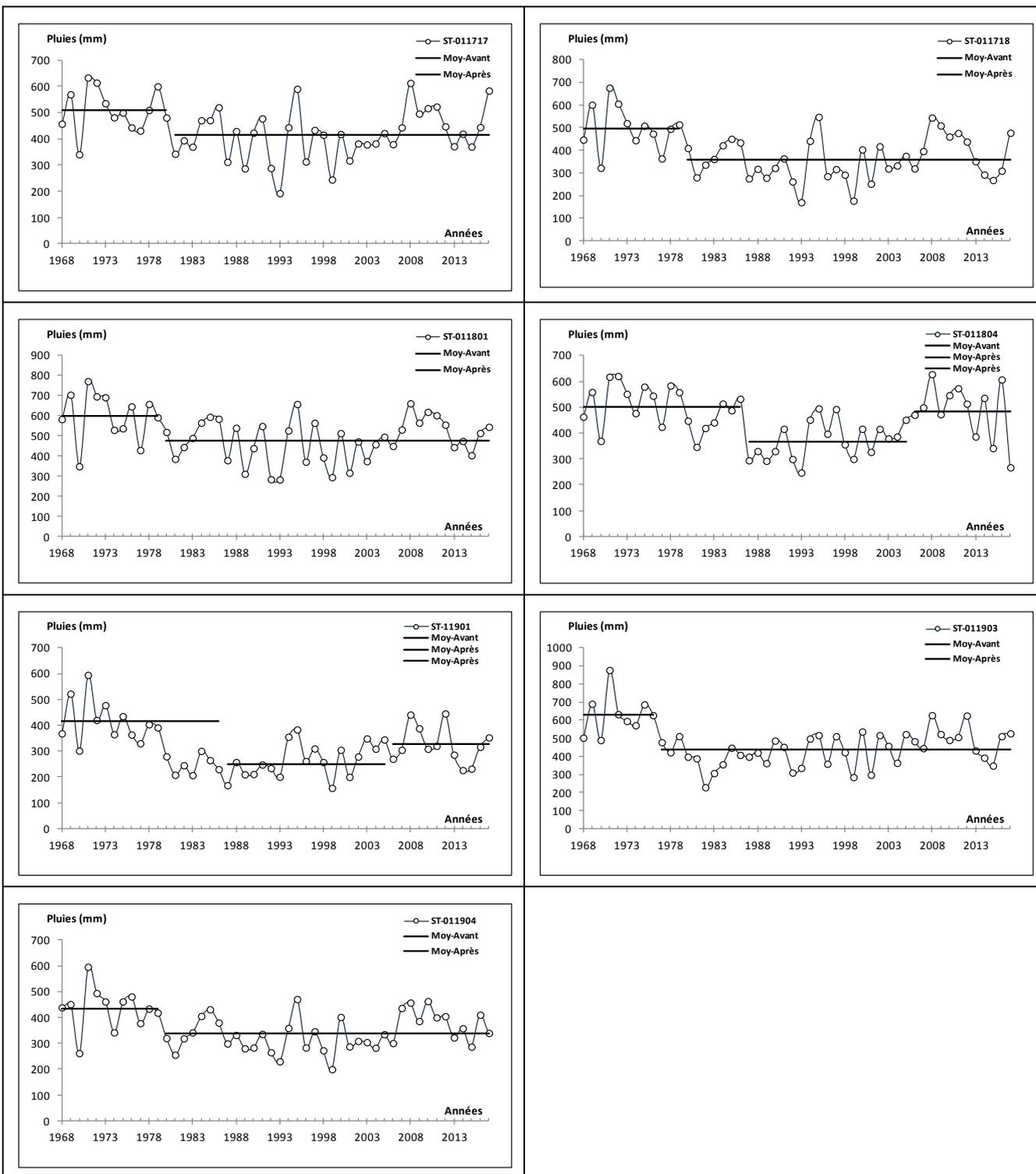
Annexe IV-2 : Résultats d'analyse de rupture dans les séries pluviométrique

Station	Nom	Intervalle de confiance	Buischand	Pettitt	Lee et Heghinian	Segmentation de Hubert	
						Rupture	Moyenne
11904	ROUINA MAIRIE	99% 95% 90%	Acceptée Rejetée Rejetée	acceptée rejetée rejetée	1979	1979 1980	434.675 339.205
11903	TOUTIA EL HASSANIA	99% 95% 90%	Acceptée Rejetée Rejetée	acceptée rejetée rejetée	1976	1976 1977	629.889 436.427
11901	EL TOUAIBIA	99% 95% 90%	Rejetée Rejetée Rejetée	rejetée rejetée rejetée	1979	1979 1980 2002	414.458 251.039 326.32
11804	AIN DEFLA	99% 95% 90%	acceptée rejetée rejetée	acceptée rejetée rejetée	1979	1986 1987 2005	501.453 367.867 483.677
11801	ARIB EBDA	99% 95% 90%	acceptée rejetée rejetée	acceptée acceptée rejetée	1979	1979 1980	598.383 477.492
11718	HARREZA BGE	99% 95% 90%	rejetée rejetée rejetée	acceptée rejetée rejetée	1979	1979 1980	497.008 359.653
11717	EL KHEMIS ANRH	99% 95% 90%	acceptée acceptée rejetée	acceptée acceptée rejetée	1980	1980 1981	507.354 414.011
11715	EL ABABSA	99% 95% 90%	acceptée acceptée rejetée	acceptée acceptée acceptée	1972	1973 1974	467.833 360.116
11711	SIDI LAKHDAR	99% 95% 90%	rejetée rejetée rejetée	acceptée rejetée rejetée	1979	1986 1987	463.516 370.442
11706	EL KHEMIS INRA	99% 95% 90%	acceptée rejetée rejetée	acceptée rejetée rejetée	1979	1991 1992 1993	456.454 228.1 415.3
11703	BORDJ EL AMIR KHALED	99% 95% 90%	rejetée rejetée rejetée	acceptée rejetée rejetée	1976	1971 1972 1976 1977	574.767 1067.4 561.92 351.407
11702	ARIB CHELIFF	99% 95% 90%	rejetée rejetée rejetée	rejetée rejetée rejetée	1979	1979 1980	571.833 408.226
11607	TARIK IBN ZIAD	99% 95% 90%	acceptée rejetée rejetée	acceptée rejetée rejetée	1976	1976 1977	689.233 446.517

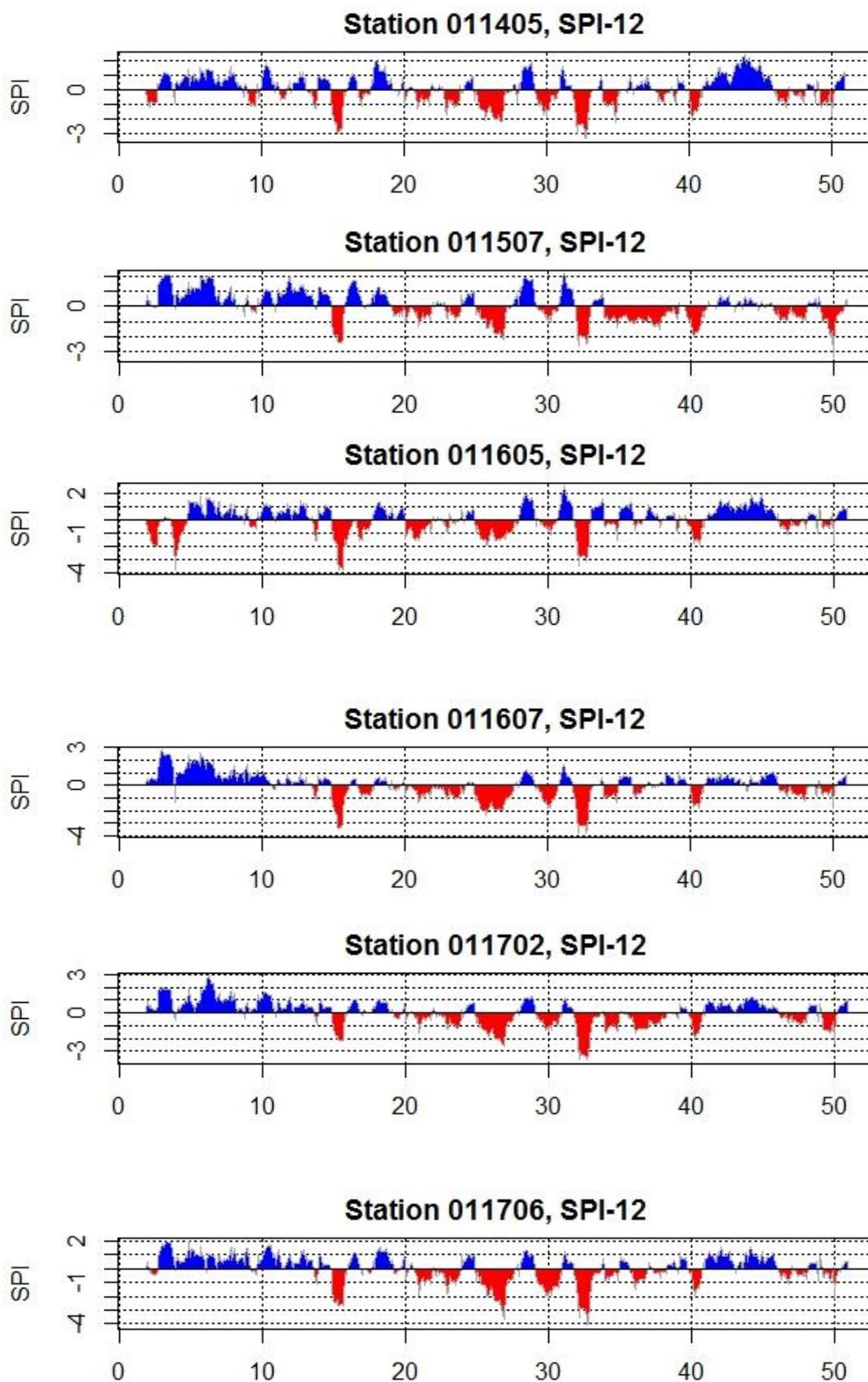
Station	Nom	Intervalle de confiance	Buischand	Pettitt	Lee et Heghinian	Segmentation de Hubert	
						Rupture	Moyenne
11606	SIDI MOKREFI	99% 95% 90%	rejetée rejetée rejetée	rejetée rejetée rejetée	1980	1980 1981	501.646 369.97
11605	THENIET EL HAD	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	1970	1968	547.478
11604	KHERBA OD HELLAL	99% 95% 90%	acceptée acceptée rejetée	acceptée acceptée rejetée	2016	1972 1973 2016	502.54 286.339 723.5
11603	BORDJ EL AMIR AEK	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	2016	Pas de rupt	
11507	AIN SULTAN	99% 95% 90%	rejetée rejetée rejetée	rejetée rejetée rejetée	1980	1980 1981	551.177 397.359
11509	MEDEA SECTEUR	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	2001	Pas de rupt	647.272
11405	GHRIB BGE	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	2016	Pas de rupt	463.936
11404	ZOUBIRIA MONGORNO	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	1973	Pas de rupt	530.088
11302	DERRAG	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	2016	Pas de rupt	528.294
11301	KSAR EL BOUKHARI GR	99% 95% 90%	acceptée acceptée acceptée	acceptée acceptée acceptée	1975	Pas de rupt	280.672

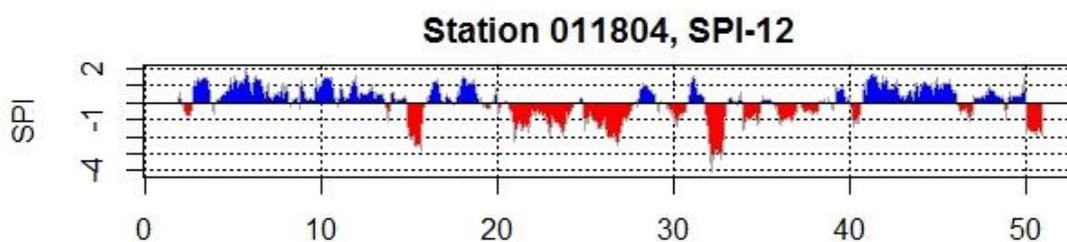
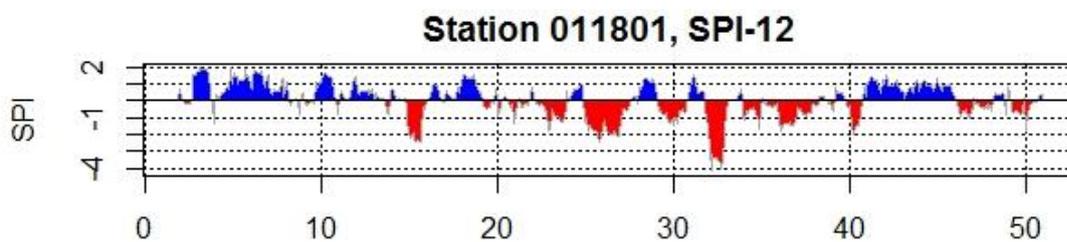
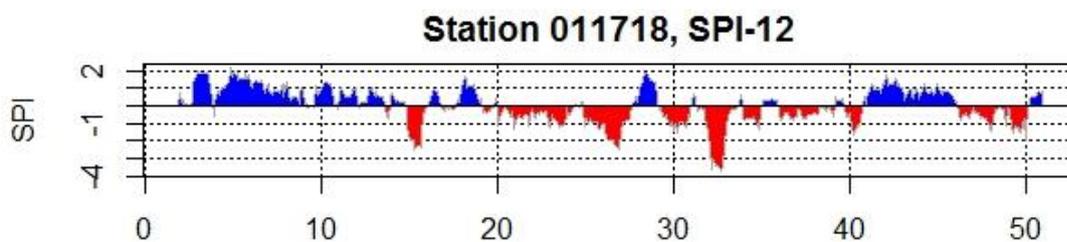
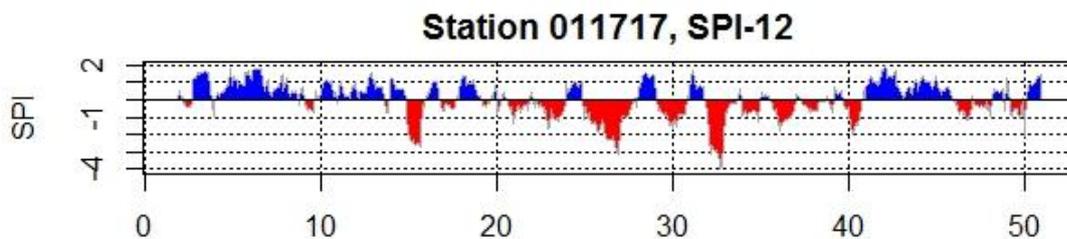
Annexe IV-2 : Graphes de la détection de rupture dans les séries pluviométriques



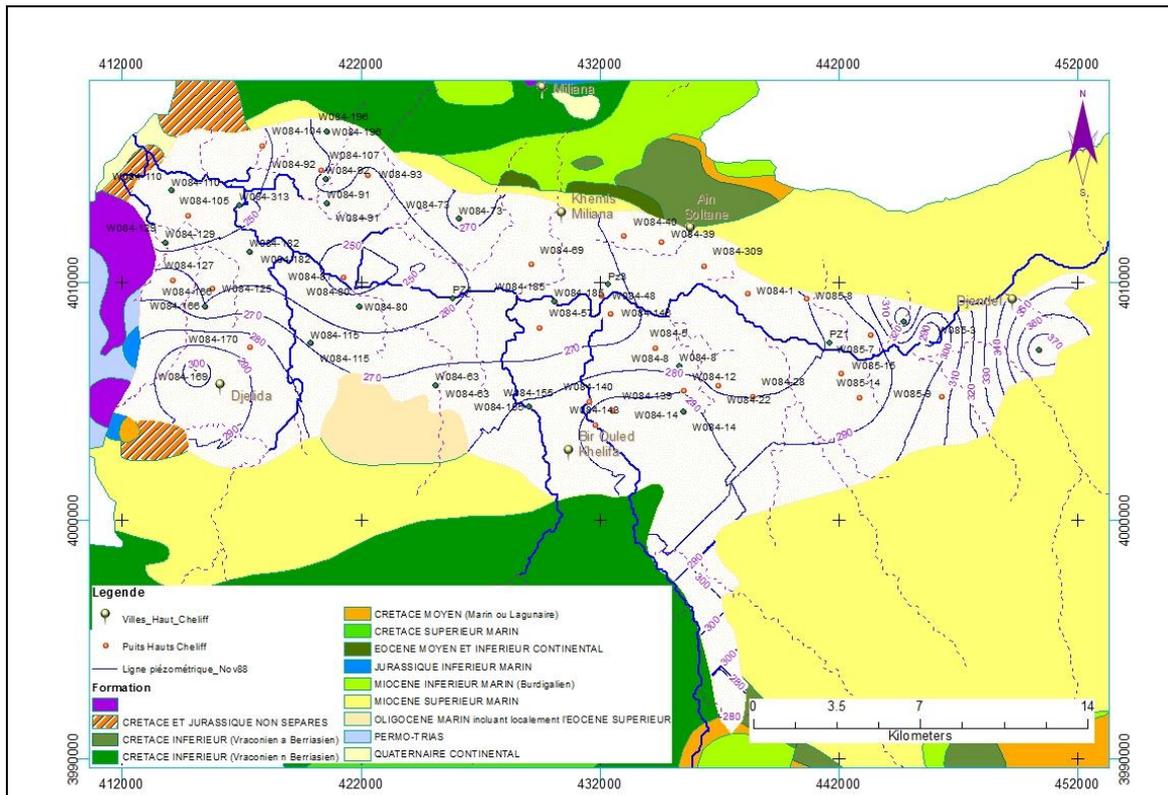


Annexe IV-3 : Indices pluviométriques standardisé (SPI -12 Mois, 1968-2017)

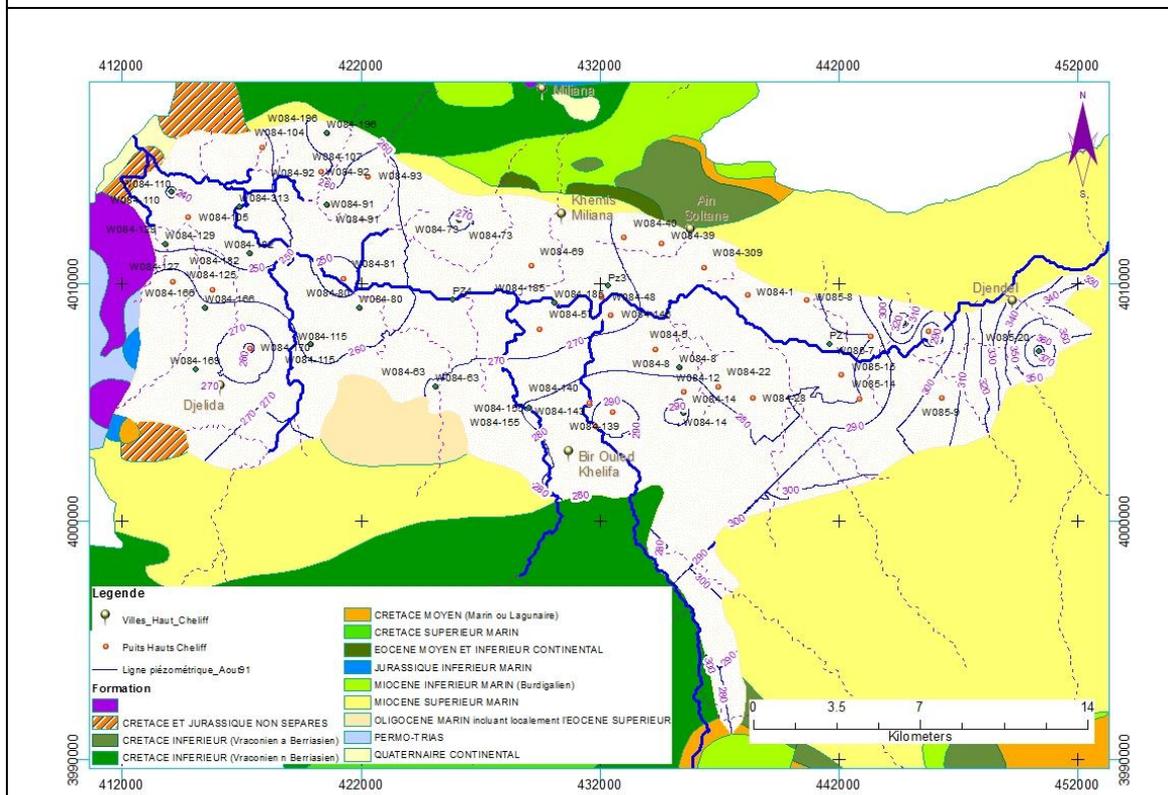




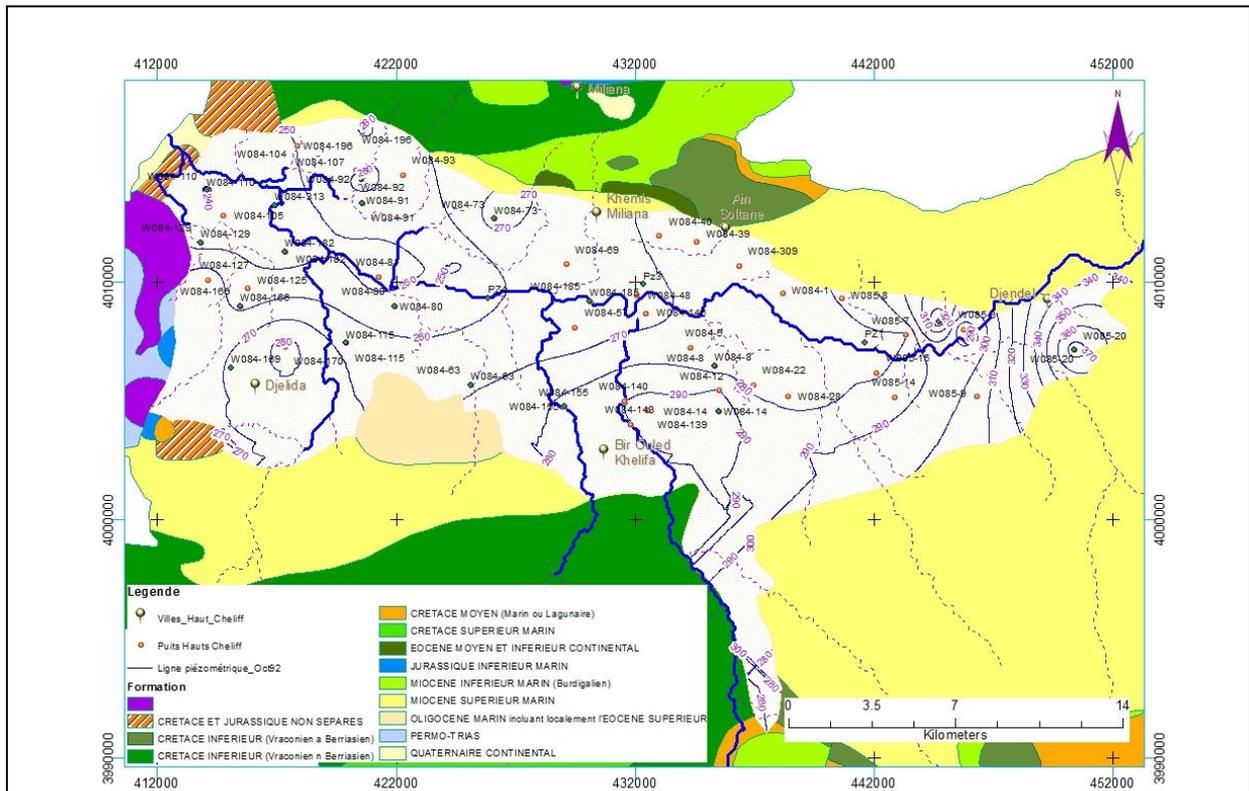
Annexes IV-4 : Cartes piézométriques des basses Eaux



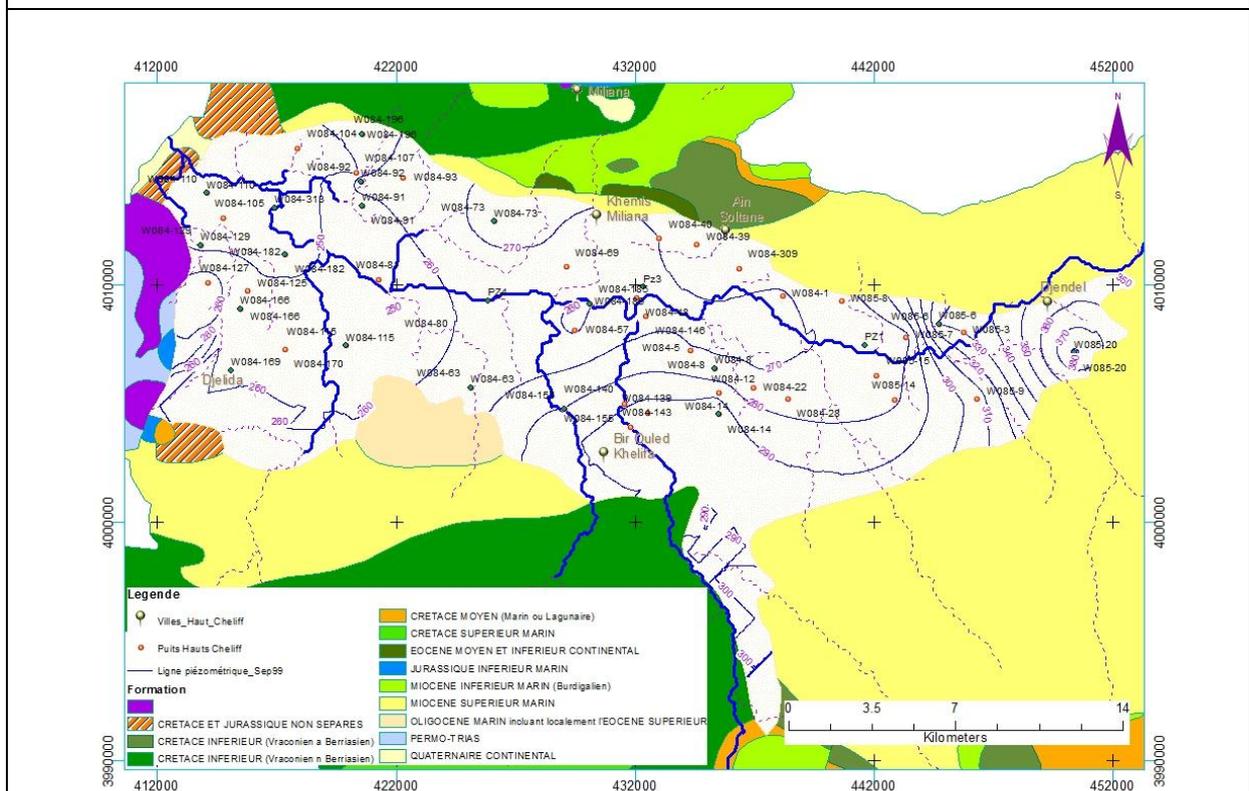
Compagne piézométrique – Novembre 1988



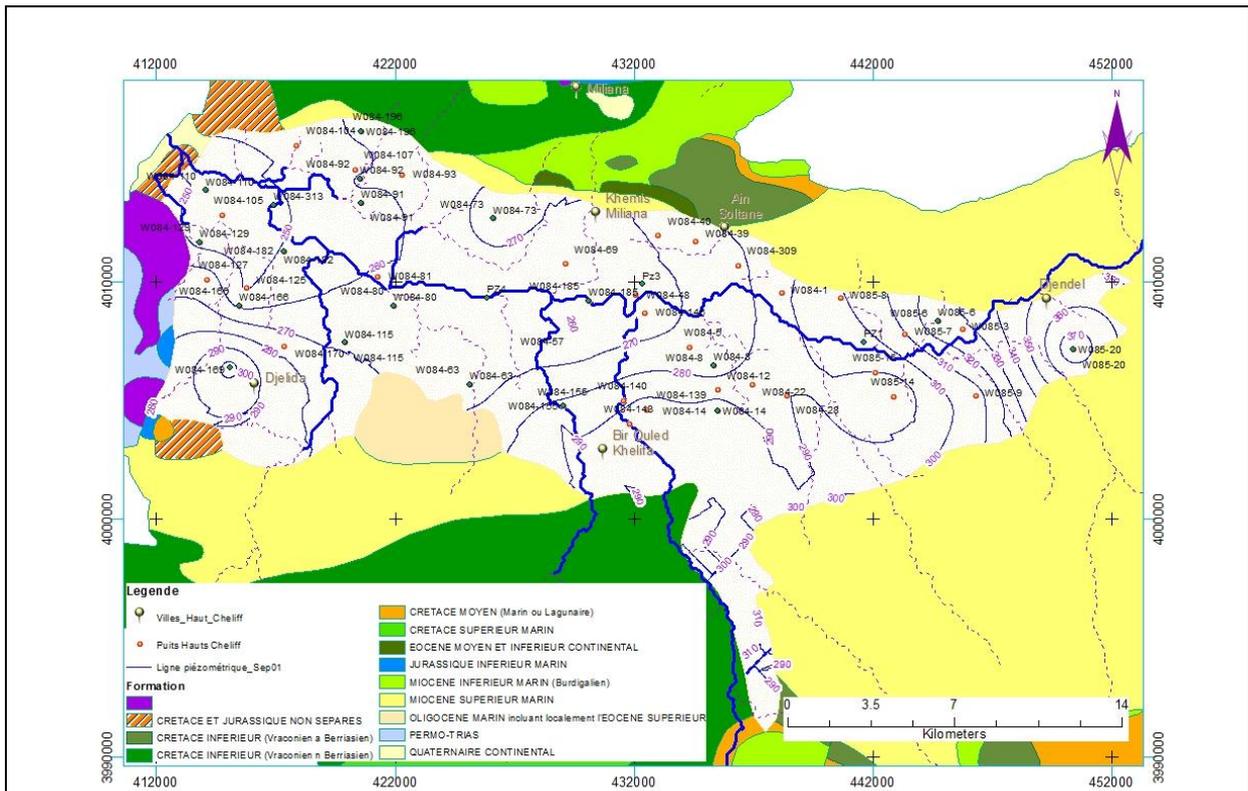
Compagne piézométrique – Novembre 1988



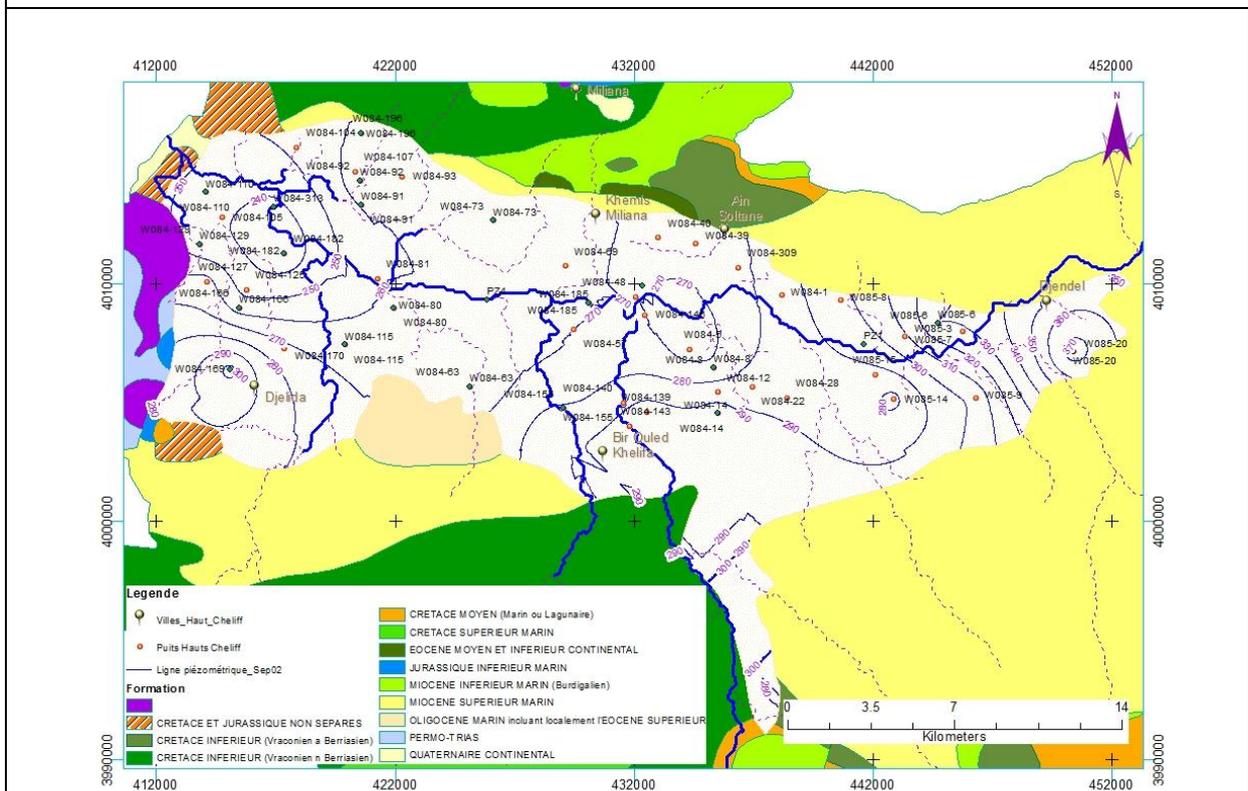
Compagne piézométrique – Octobre 1992



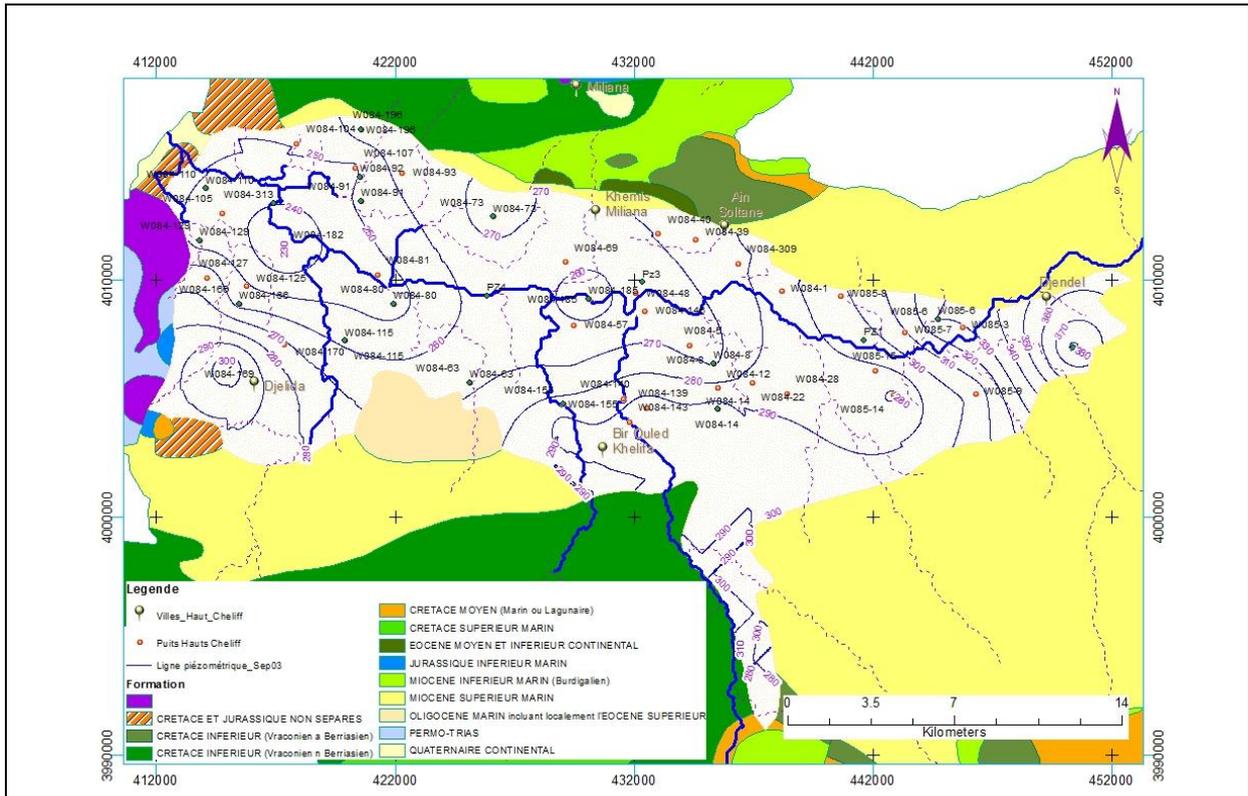
Compagne piézométrique – Septembre 1999



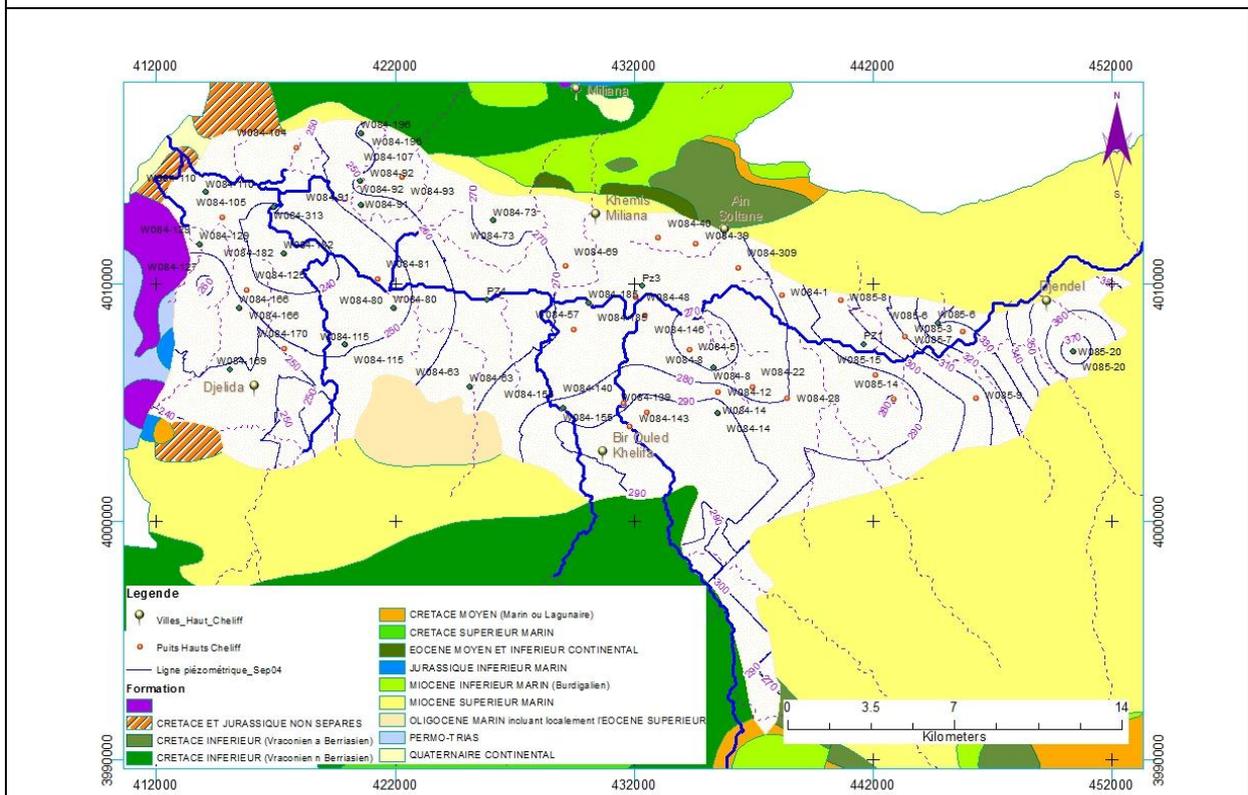
Compagne piézométrique – Septembre 2001



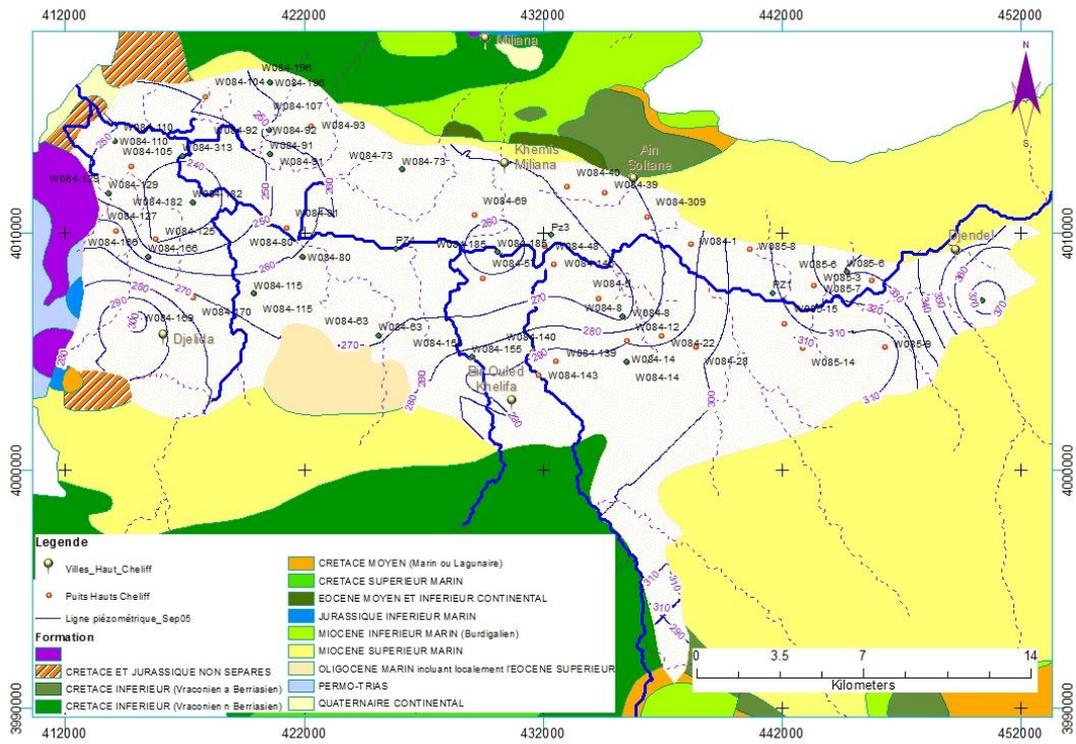
Compagne piézométrique – Septembre 2002



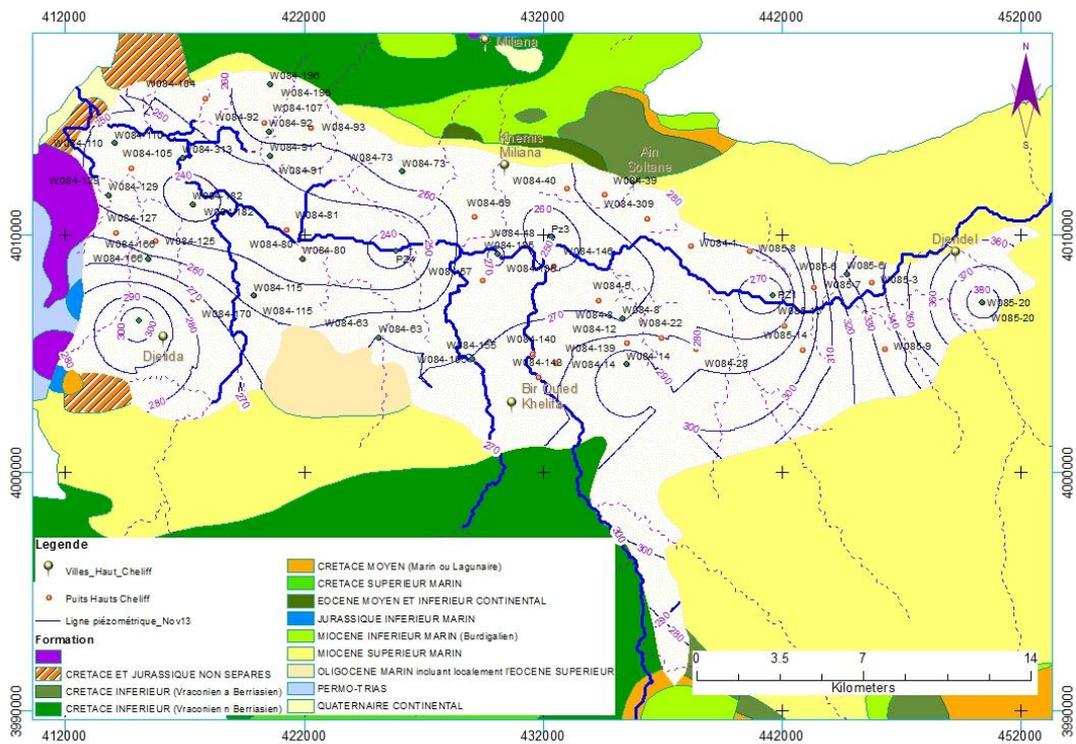
Compagne piézométrique – Septembre 2003



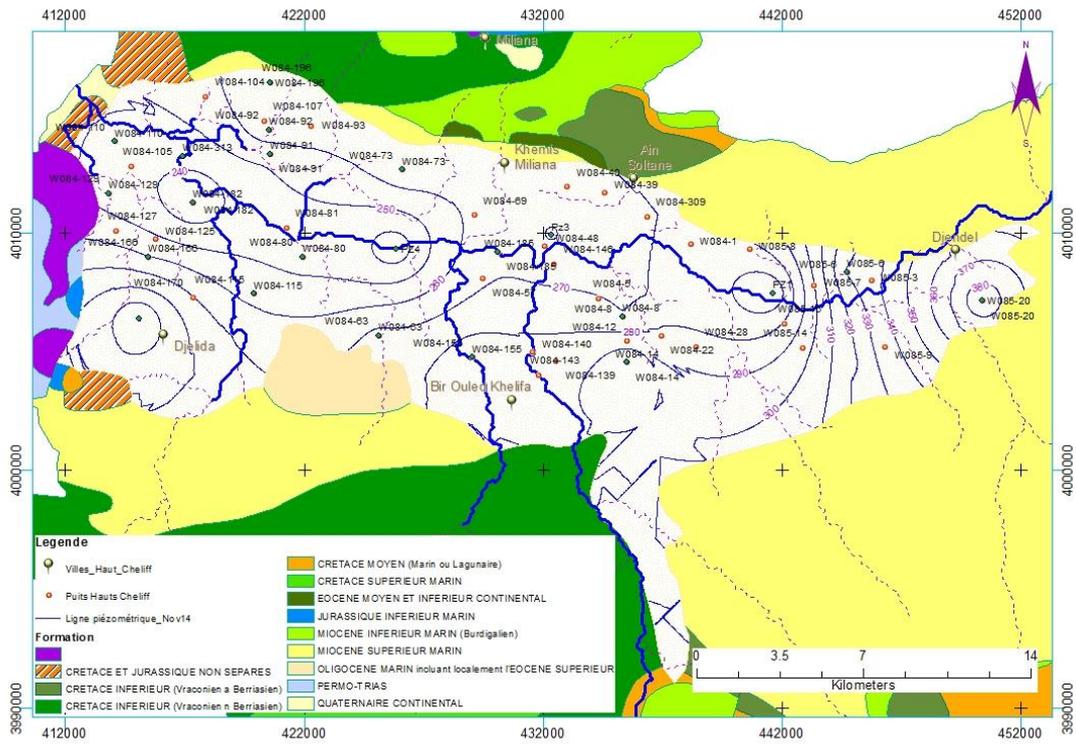
Compagne piézométrique – Septembre 2004



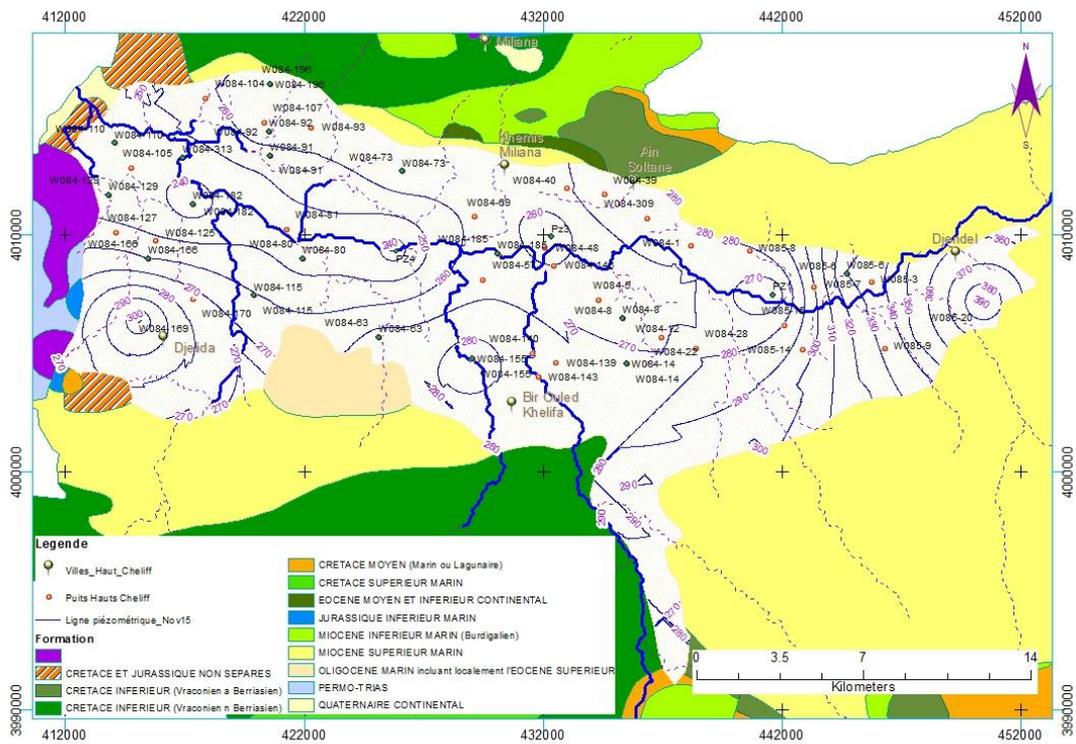
Compagne piézométrique – Septembre 2005



Compagne piézométrique – Novembre 2013

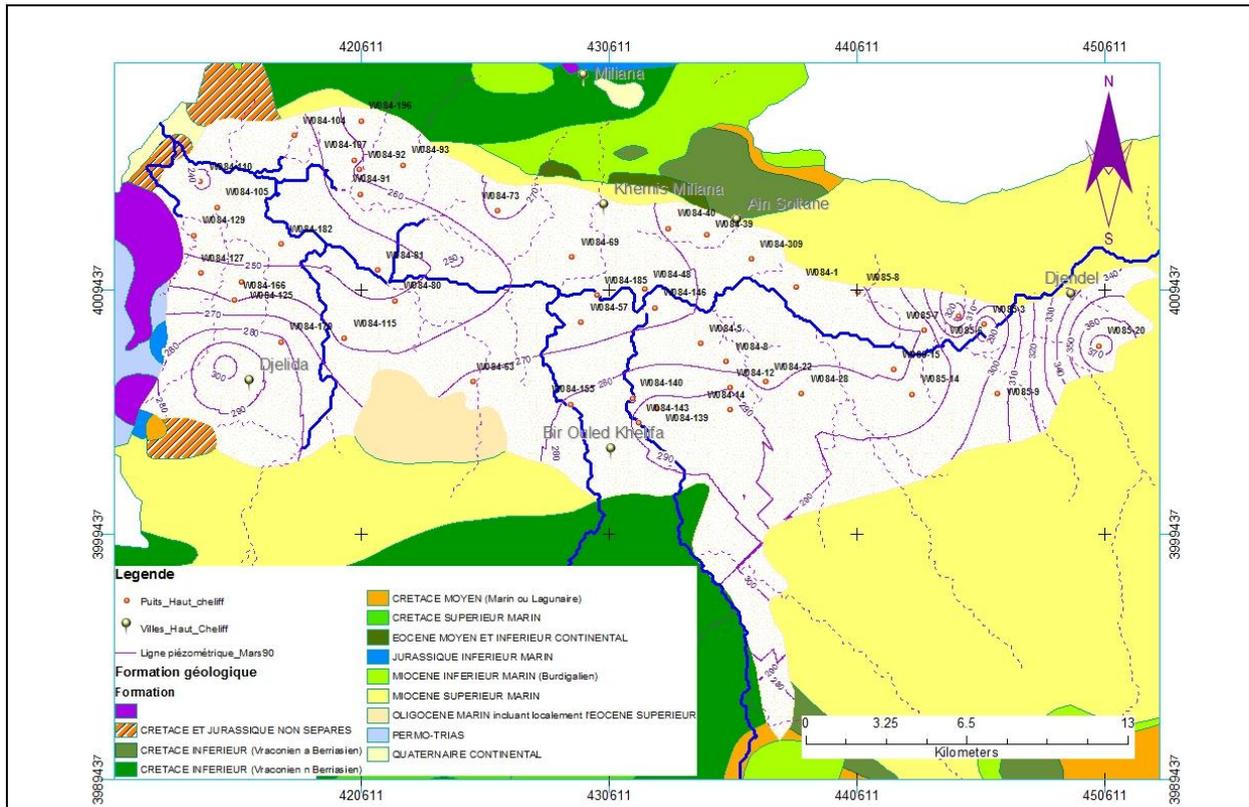


Compagne piézométrique – Novembre 2014

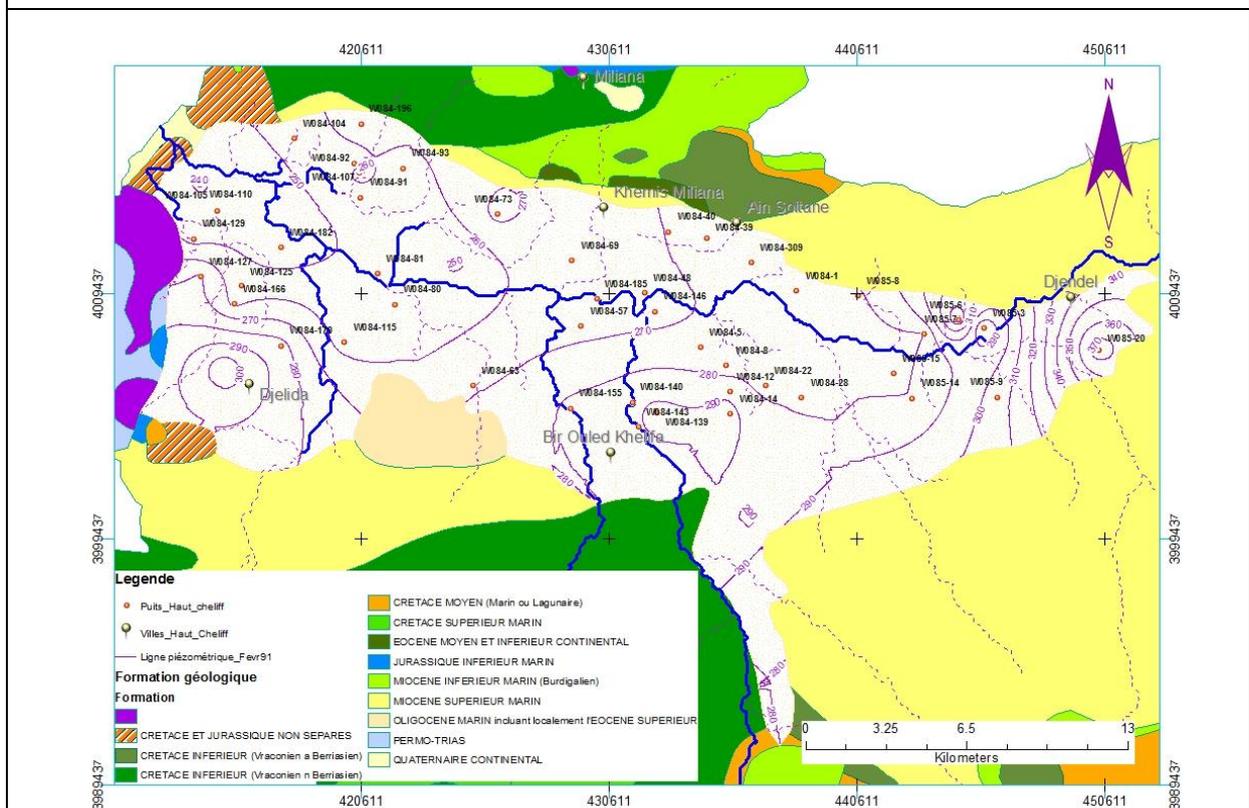


Compagne piézométrique – Novembre 2015

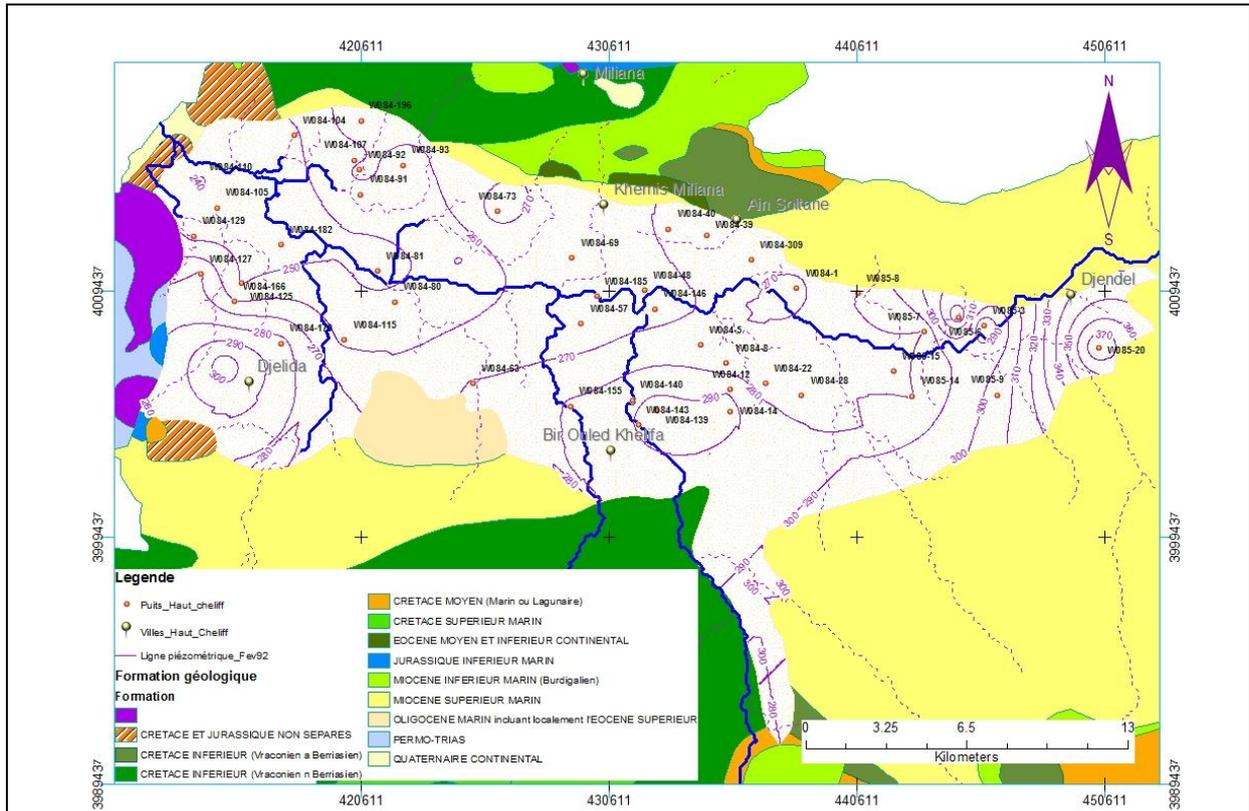
Annexes IV-04 : Cartes piézométriques des Hautes Eaux



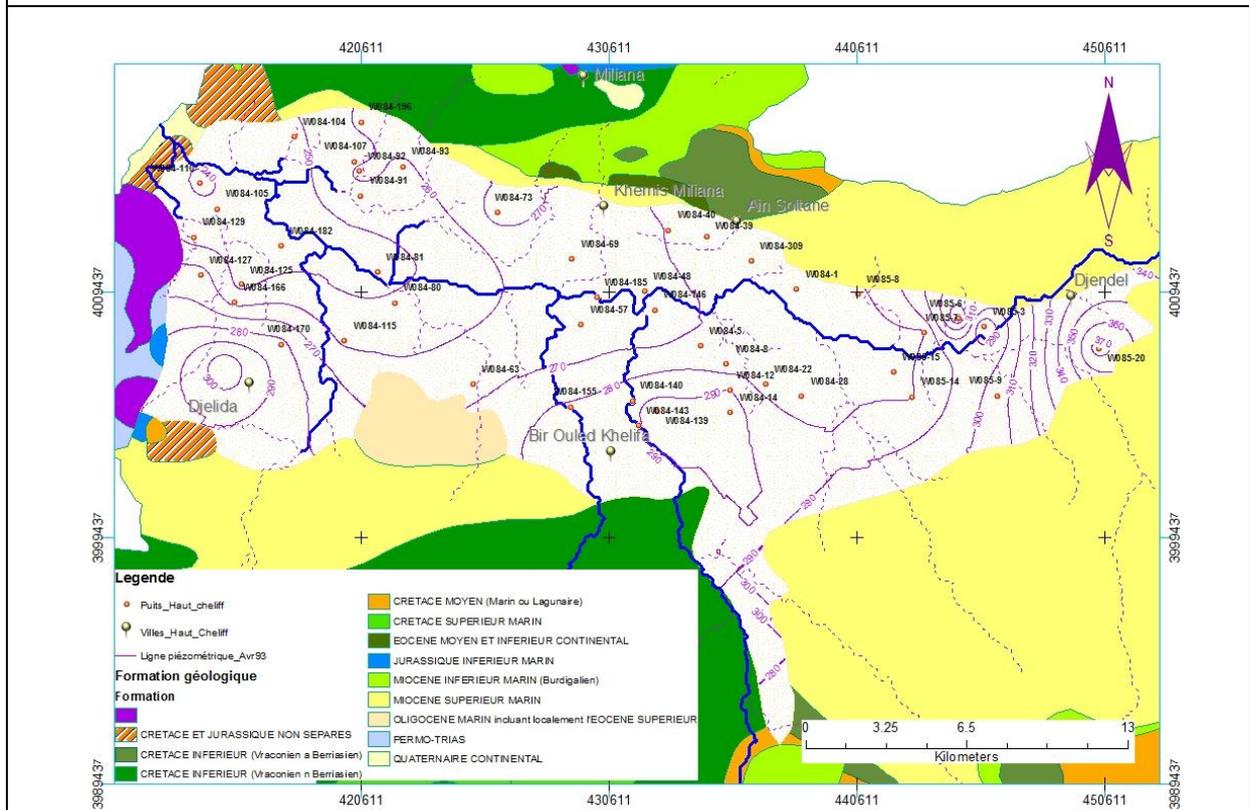
Compagne piézométrique – Mars 1990



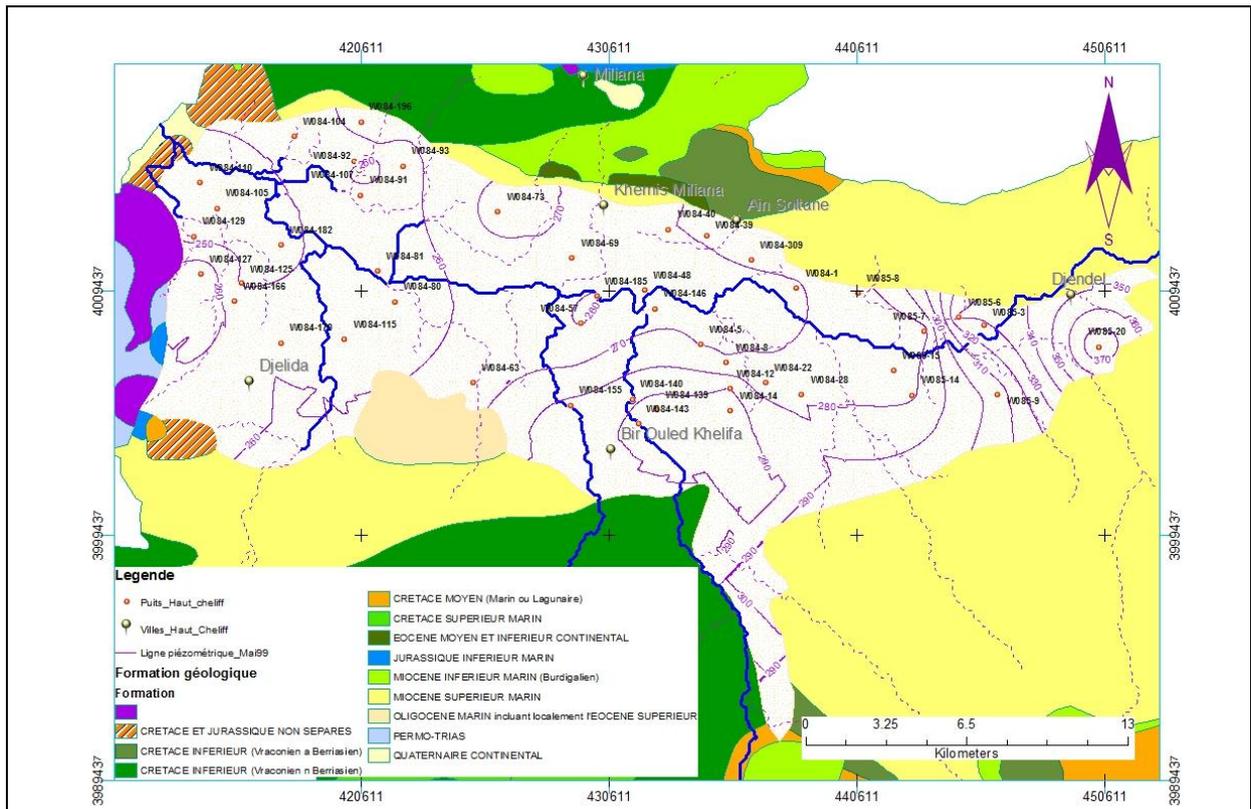
Compagne piézométrique – Février 1991



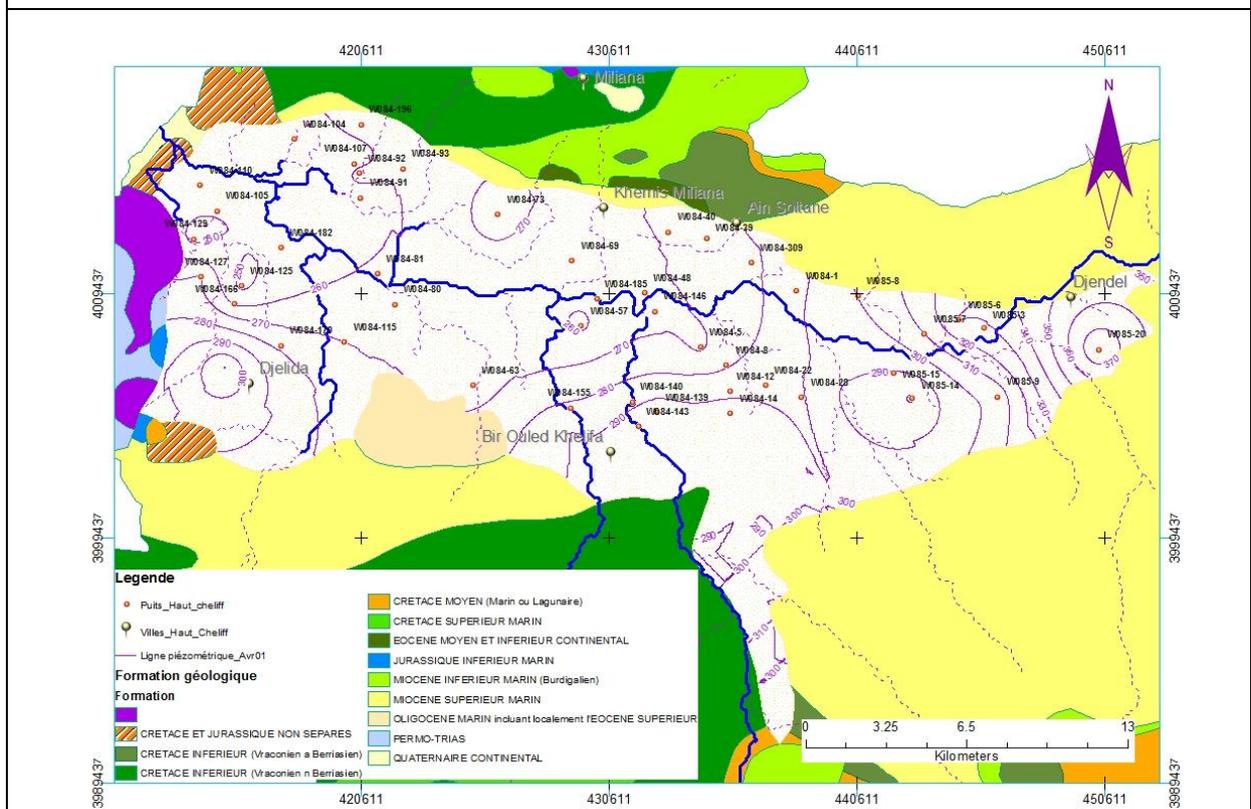
Compagne piézométrique – Février 1992



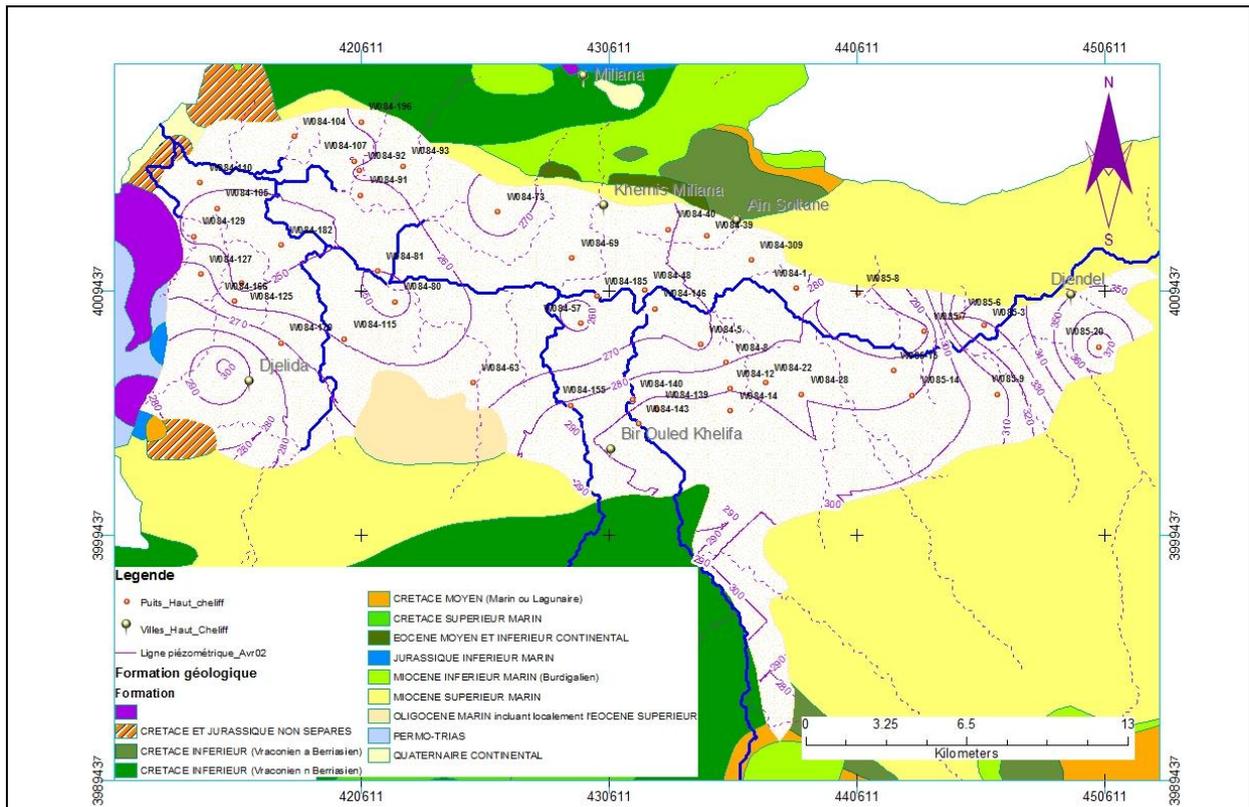
Compagne piézométrique – Avril 1993



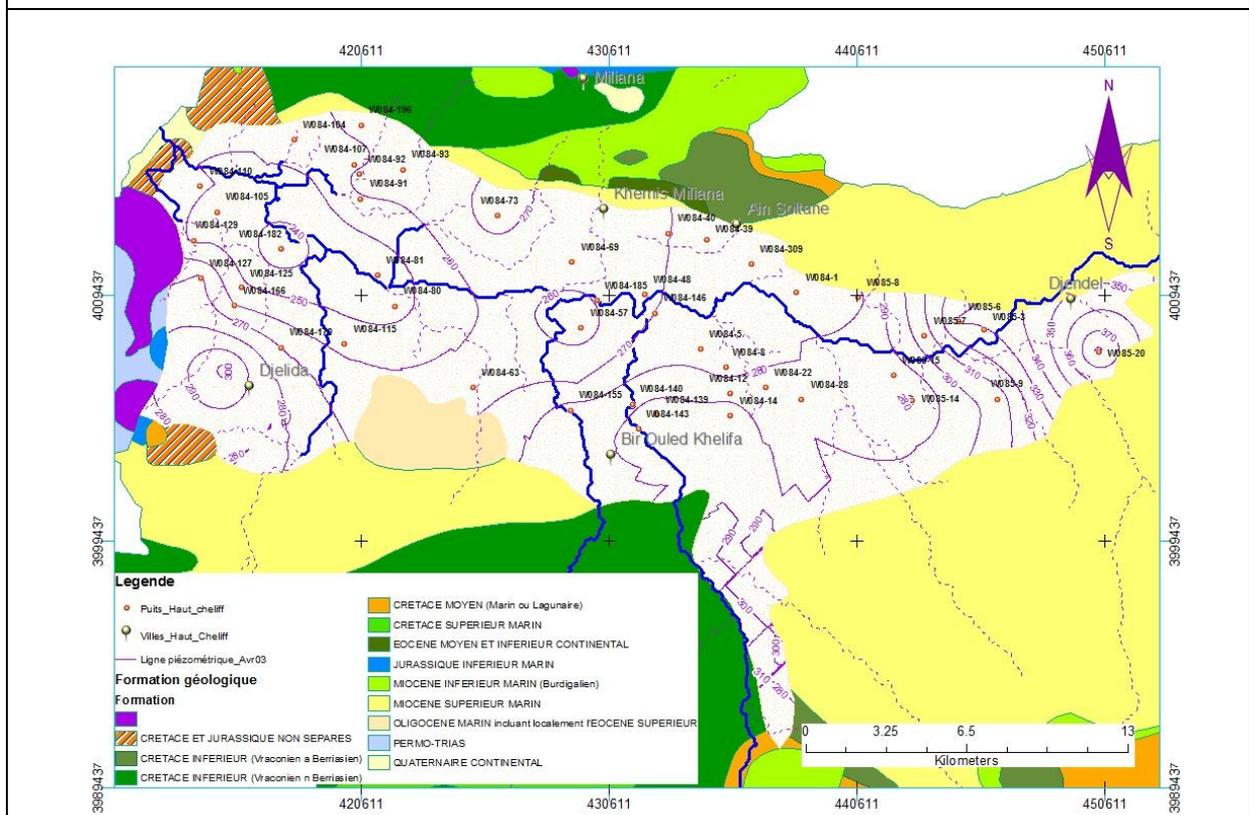
Compagne piézométrique – Mai 1999



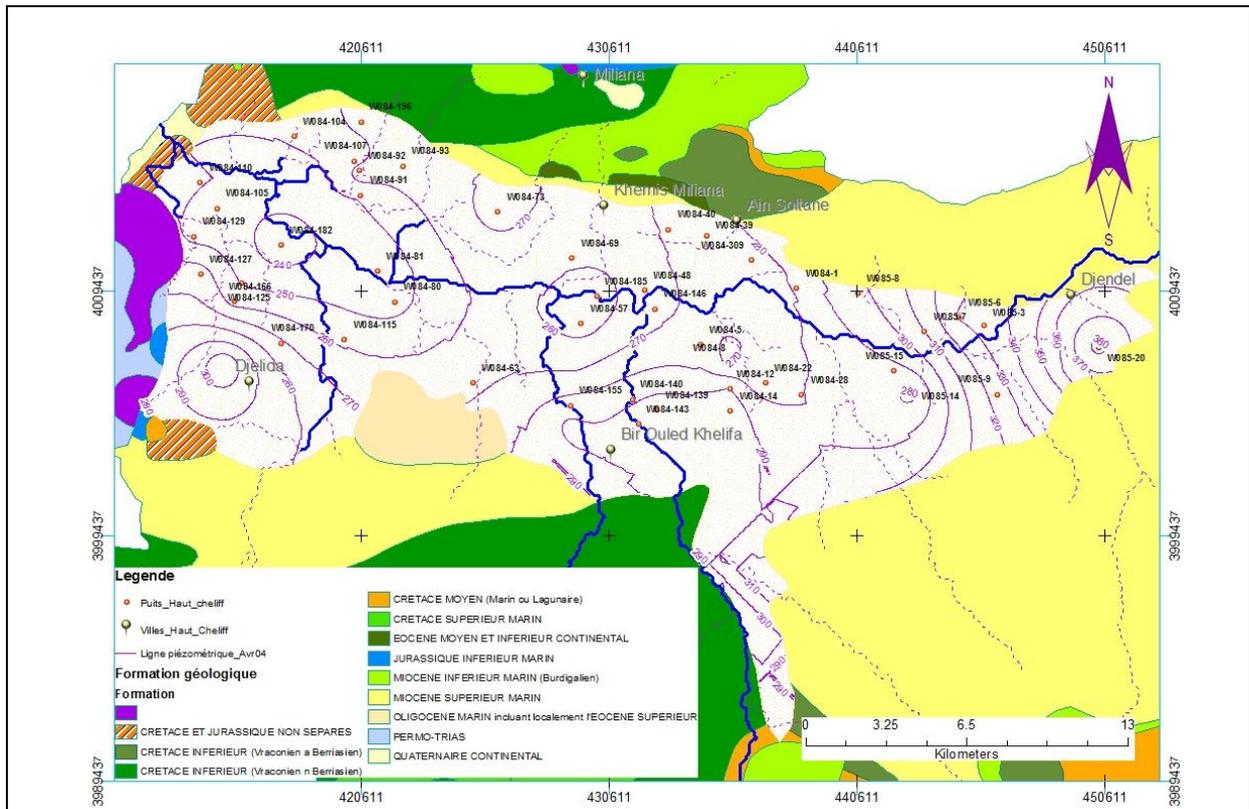
Compagne piézométrique – Avril 2001



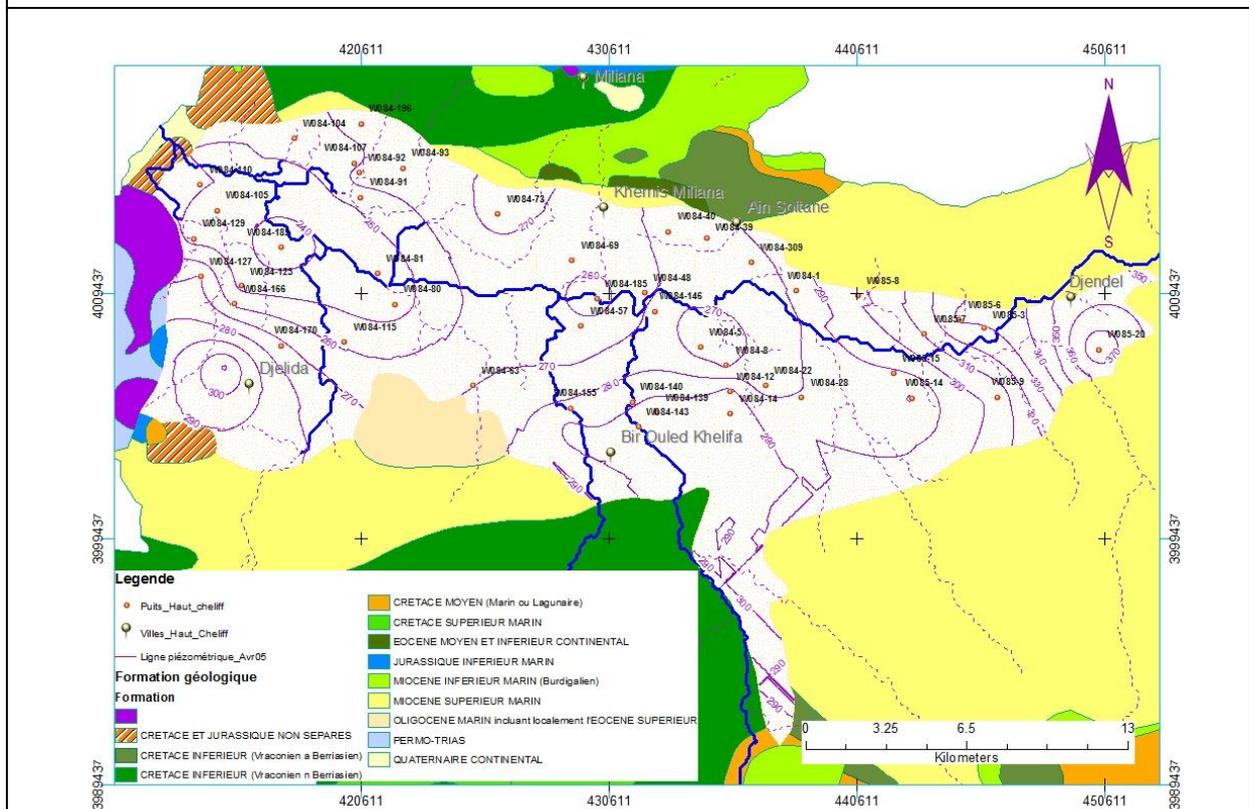
Compagne piézométrique – Avril 2002



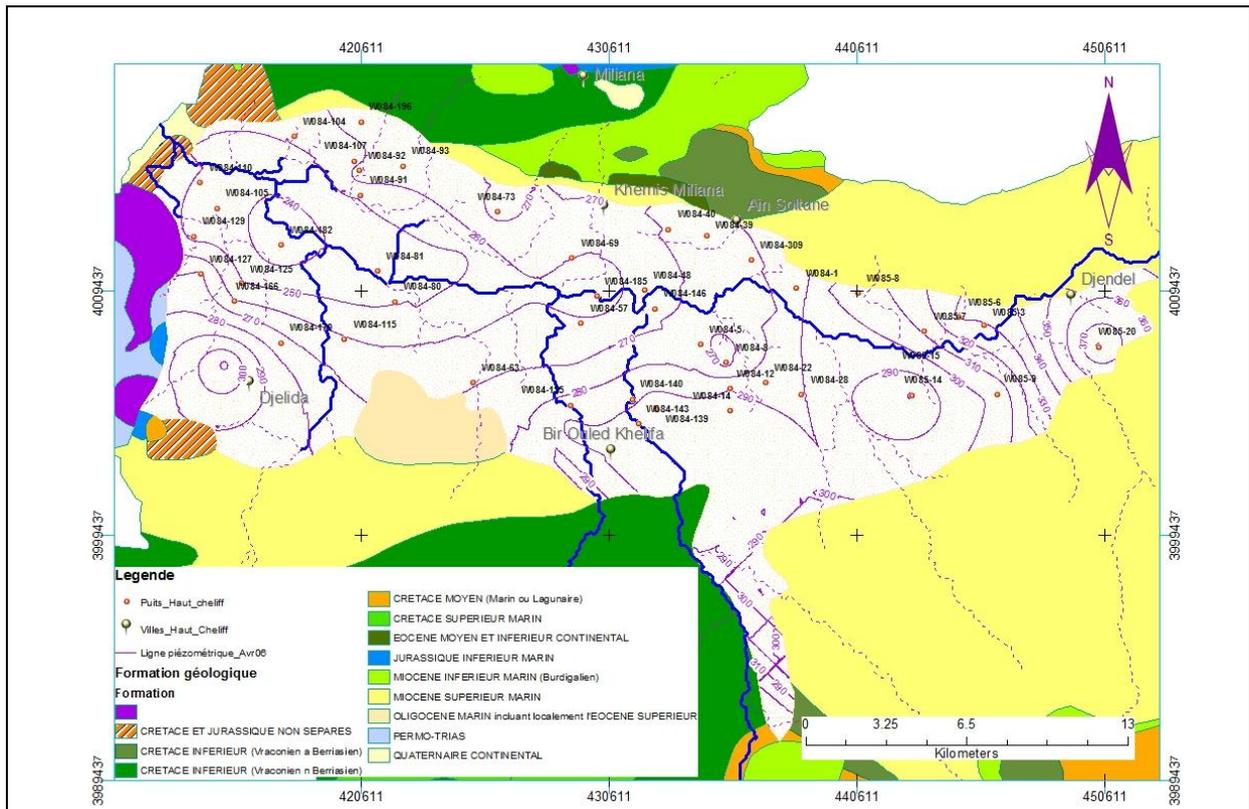
Compagne piézométrique – Avril 2003



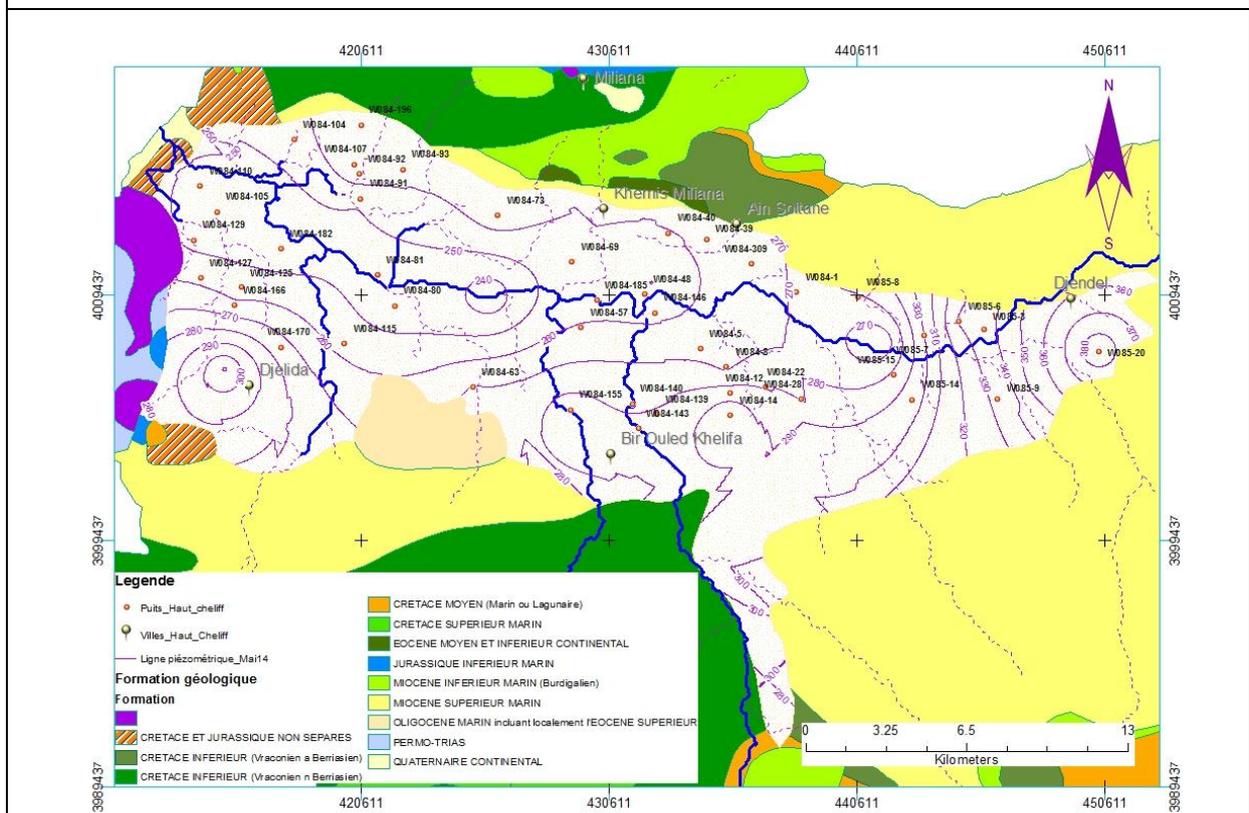
Compagne piézométrique – Avril 2004



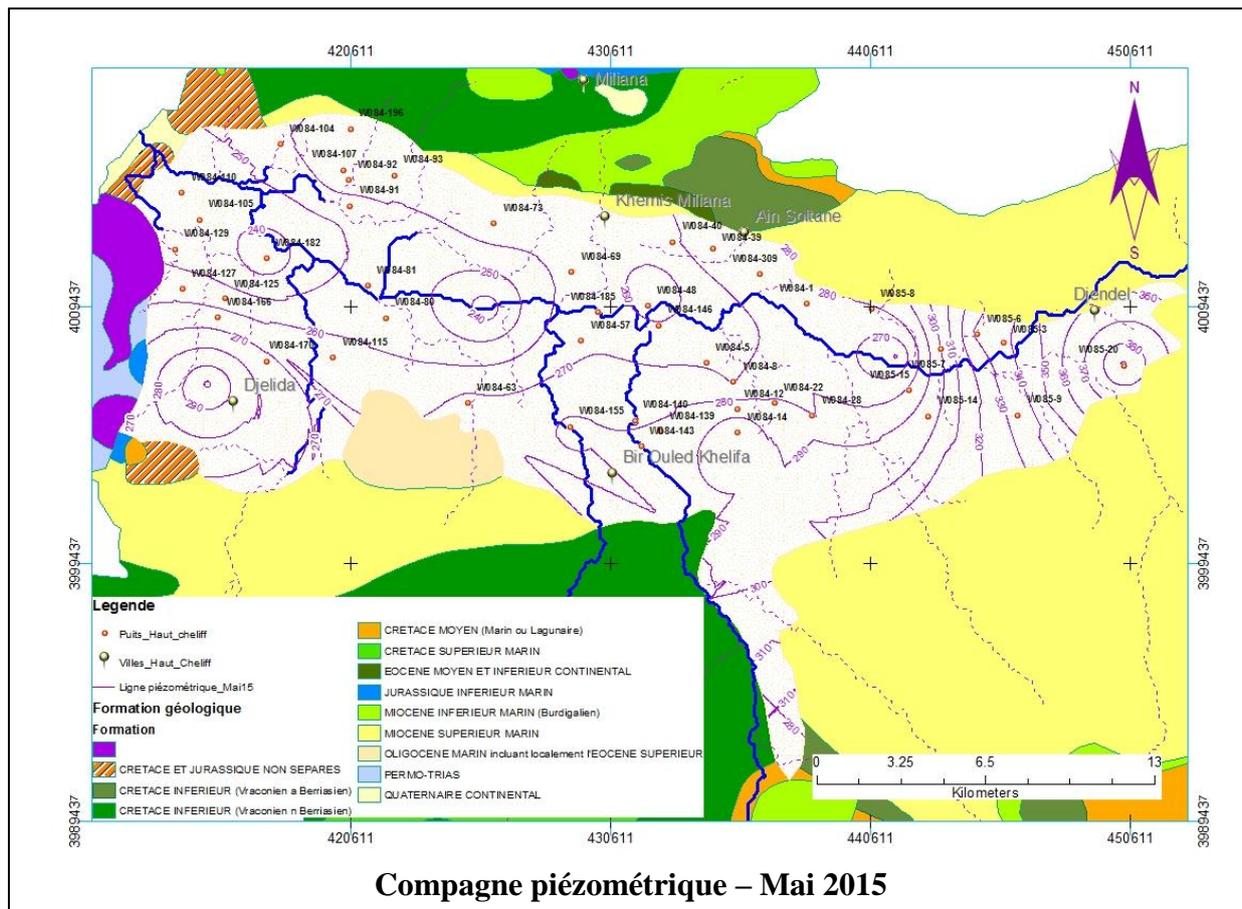
Compagne piézométrique – Avril 2005



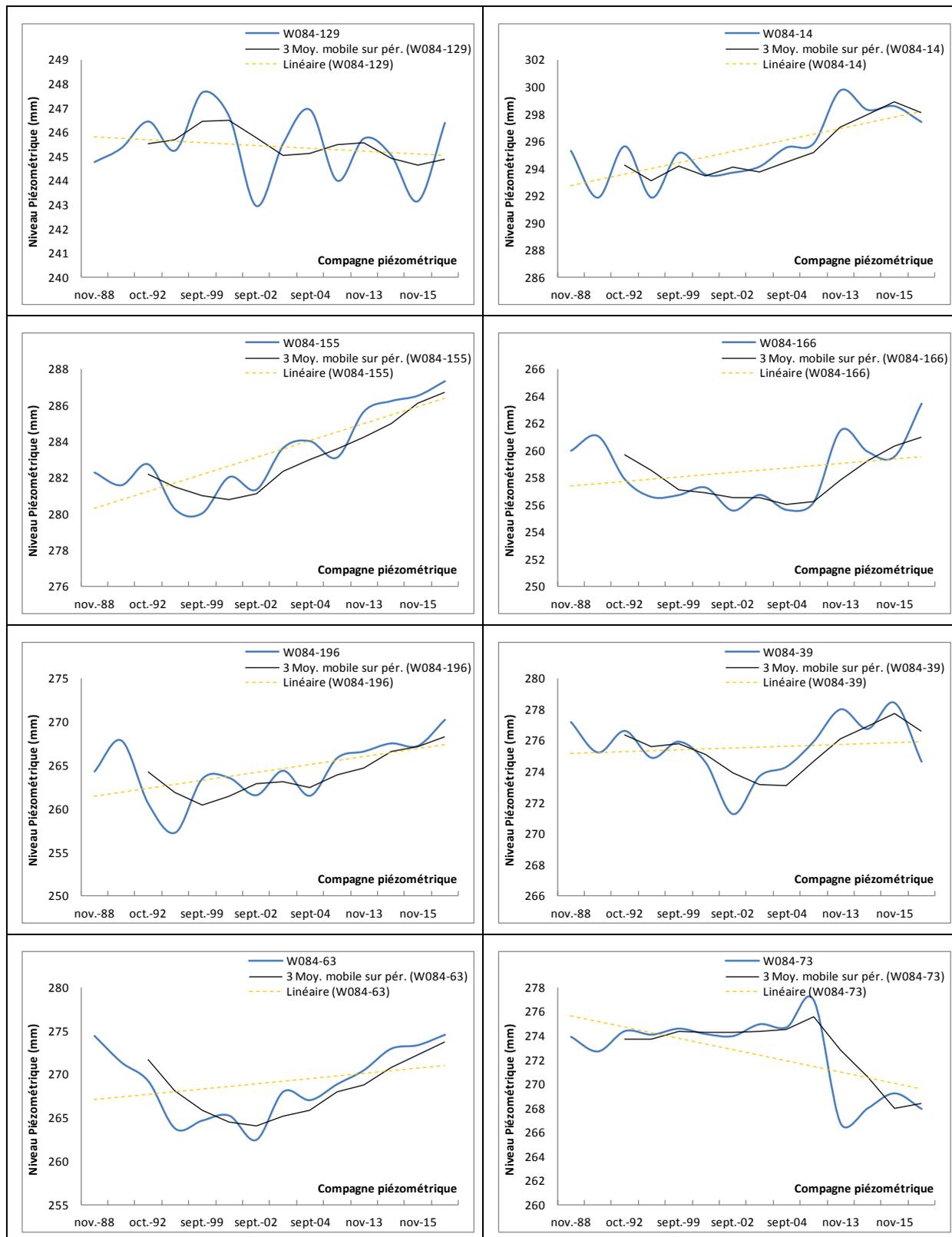
Compagne piézométrique – Avril 2006

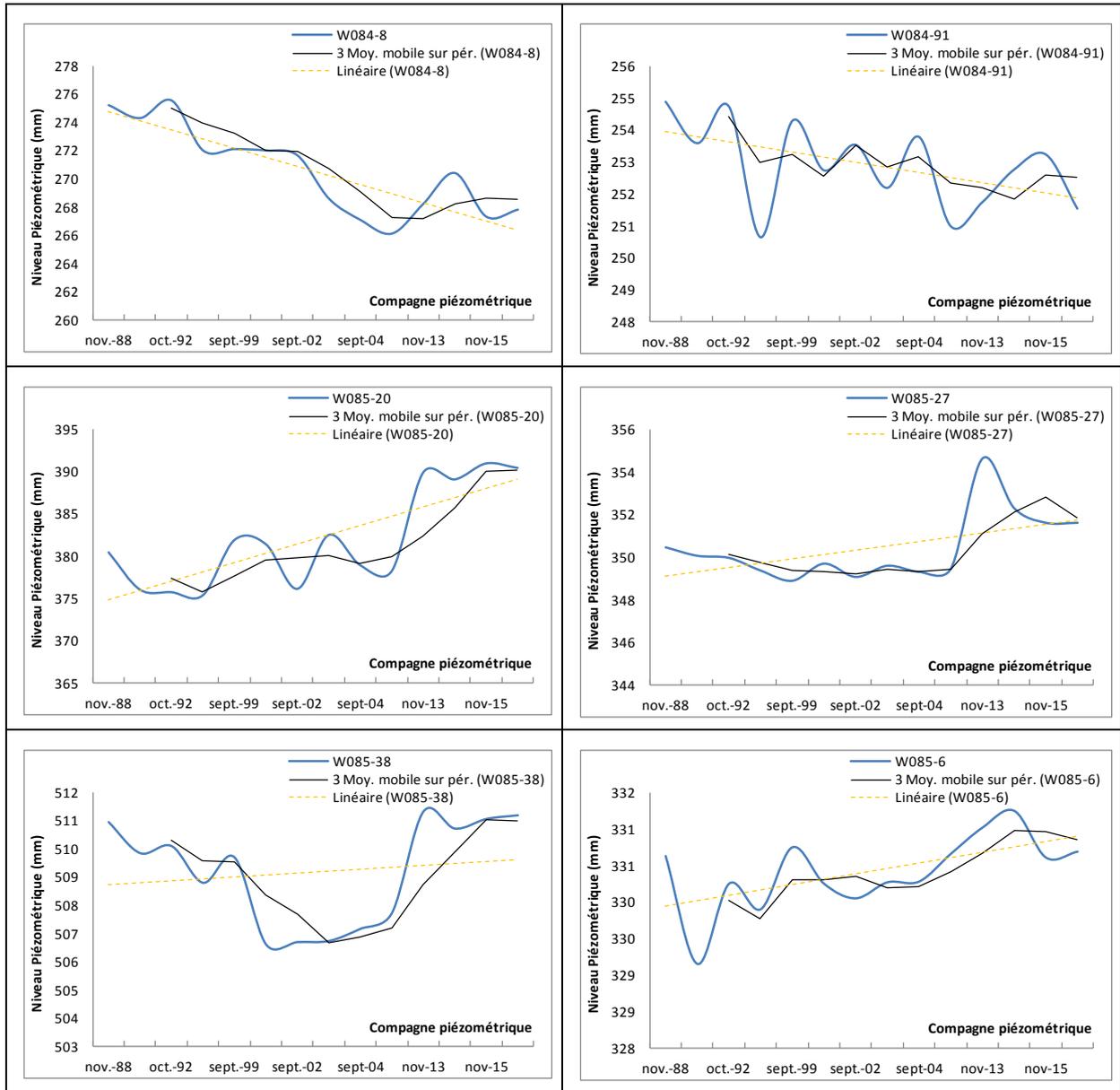


Compagne piézométrique – Mai 2014



Annexe IV-5 : Évolution des niveaux piézométriques des basses eaux





Annexe IV-5 : Évolution des niveaux piézométriques des hautes eaux

