

RAPPORT DE STAGE

Master 2 Recherche Eau et Environnement (R2E)

EVOLUTION CONJOINTE DE LA RESSOURCE EN EAU
SOUTERRAINE ET DE L'IRRIGATION EN ZONE SEMI-ARIDE.
EXEMPLE DE LA PLAINE DE KAIROUAN (TUNISIE CENTRALE)

Rami ALBASHA

Octobre 2010

Encadrants :

Christian LEDUC et

Jean Christophe POUSSIN

Sommaire

Introduction.....	1
I – Les bassins versants méditerranéens	2
I – 1 – Caractéristiques topographiques.....	2
I – 2 – Caractéristiques climatiques.....	2
I – 3 – Caractéristiques démographiques.....	3
I – 4 – Caractéristiques socio-économiques.....	3
I – 5 – Conclusion.....	4
II – Zone d'étude, la plaine de Kairouan.....	5
II – 1 – Contexte topographique.....	6
II – 2 – Contexte climatique.....	6
II – 3 – Contexte démographique	7
II – 4 – Contexte géologique et hydrogéologique	7
II – 5 – Les ressources d'eau et leur évolution	9
III – Analyse de l'évolution des prélèvements.....	12
III – 1 – Données disponibles	12
III – 1 – 1 – Réseau de surveillance.....	12
III – 1 – 2 – Anomalies	14
III – 2 – Analyse de la piézométrie.....	15
III – 2 – 1 – Discussion de l'influence de la pluie	15
III – 2 – 2 – Représentation des apports.....	19
III – 2 – 3 – Représentation des prélèvements.....	21
III – 2 – 4 – Analyse graphique de la piézométrie	23
III – 2 – 4 – 1 – Regroupement des piézomètres en familles de comportement homogène	23
III – 2 – 4 – 2 – Regroupement en familles de pareilles baisses	28
III – 2 – 4 – 3 – Regroupement en familles de pareilles fluctuations	32
III – 2 – 4 – 4 – Résultat des regroupements et discussion	34
III – 2 – 3 – Analyse statistique de la piézométrie	38
III – 2 – 3 – 1 – Méthode de la corrélation croisée.....	38
III – 2 – 3 – 1 – 1 – Principe.....	38
III – 2 – 3 – 1 – 2 – Application et résultats	38
III – 2 – 3 – 1 – 3 – Discussion des résultats et conclusion	40

III – 2 – 3 – 2 – Méthode du « Bruit blanc »	41
III – 2 – 3 – 1 – 1 – <i>Principe</i>	41
III – 2 – 3 – 1 – 2 – <i>Application et résultats</i>	42
III – 2 – 3 – 1 – 3 – <i>Conclusion</i>	44
Conclusion générale	45
Références bibliographiques	47
Annexes	50

Introduction

Durant les dernières décennies, la région méditerranéenne a connu une forte augmentation de la pression sur les ressources en eau, due à plusieurs raisons dont les plus importantes sont la croissance démographique, l'expansion de l'agriculture irriguée et le développement du tourisme. Pour répondre à des besoins nouveaux, les bassins versants méditerranéens ont été aménagés par des milliers d'ouvrages hydrauliques qui visent à maximiser les ressources en eau disponibles. Cependant, dans le domaine de l'agriculture, l'absence d'une gestion adéquate des ressources en eau et l'insuffisance des apports pluvieux incitent les agriculteurs à chercher à satisfaire leurs besoins en eau individuellement, dans la plupart des cas par des puits privés dont le contrôle par les autorités est souvent inefficace ou inexistant. Ceci engendre une baisse incontrôlée des niveaux des nappes souterraines.

Le cas de la plaine de Kairouan est un cas typique d'une plaine méditerranéenne largement sollicitée par l'agriculture qui représente le consommateur majeur de l'eau et dont les prélèvements constituent l'essentiel des prélèvements totaux. Dans la plaine de Kairouan, les exploitations agricoles utilisent surtout des puits et forages privés captant une importante nappe aquifère. Celle-ci est de fait une nappe en accès libre, où les volumes prélevés sont supérieurs aux apports. Cela a engendré une baisse piézométrique constante depuis une vingtaine d'années.

Dans un premier temps, le but initial de ce stage était d'estimer les prélèvements de la nappe par l'agriculture et de les mettre ensuite en relation avec les variations des niveaux piézométriques. L'estimation des prélèvements était à faire par deux voies : agronomique et hydrogéologique. A cet effet, une visite de terrain était importante pour deux raisons : pour mieux connaître la zone d'étude et pour collecter des données essentielles surtout pour l'estimation de la consommation en eau agricole. Ce travail de terrain n'a pas pu avoir lieu pour des raisons administratives, et le stage a dû être adapté en conséquence. Les études agronomiques qui ont été menées sur la zone d'étude et qui ont estimé la consommation en eau par l'agriculture sont citées au cours de ce rapport. Ces études constituaient les seules données disponibles sur l'agriculture de la nappe. Ainsi, nous avons trouvé inintéressant de reprendre les mêmes bases de données (qui n'étaient pas toujours disponibles) et de refaire les calculs qui nous auraient amenés aux mêmes résultats. Donc finalement, nous n'avons intégré dans ce rapport que le travail qui a été fait par voie hydrogéologique.

Dans ce qui suit, une description de la zone méditerranéenne est proposée dans un premier temps. Puis vient la description de la zone d'étude en abordant les différentes caractéristiques qui en font un cas méditerranéen typique. L'état actuel des connaissances sur les ressources en eau et le développement de l'agriculture seront détaillés dans cette partie. Enfin viendra une analyse de la piézométrie de la zone d'étude abordée par deux méthodes (graphique, statistique).

I – Les bassins versants méditerranéens

Les bassins versants méditerranéens peuvent s'étendre entièrement dans un seul pays (comme par exemple le bassin versant du Guadalquivir en Espagne) ou, plus rarement, sur plusieurs pays (bassin versant de l'Oronte entre le Liban et la Syrie ou la Strouma entre la Bulgarie et la Grèce). Cependant, d'un point de vue climatique, la notion d'un bassin versant méditerranéen dépasse les limites géographiques ; ainsi la Californie, le Chili central, le sud-ouest et une partie du sud d'Australie et la région du Cap en Afrique du sud sont aussi considérées comme méditerranéennes. De même, il existe toujours des débats sur l'appartenance de certains bassins versants au bassin méditerranéen, notamment celui du Nil que certains références hésitent à considérer entièrement comme un bassin versant méditerranéen (Plan bleu, 2004).

Néanmoins, la région méditerranéenne se caractérise par plusieurs éléments topographiques, climatiques, démographique, socio-économiques qui la distinguent d'autres régions du monde.

I – 1 – Caractéristiques topographiques

Les bassins versants méditerranéens (Annexe 1) s'étendent entre les latitudes 30°N et 46°N et entre les longitudes 6°E et 41°W. Ils sont répartis entre trois continents : l'Europe, l'Asie et l'Afrique. Les reliefs du littoral méditerranéen varient entre des côtes basses prolongées par des larges plaines (par exemple de la Tunisie à l'Égypte et à la bande de Gaza) et des montagnes dont certaines atteignent ou dépassent 3000 m à quelques dizaines de kilomètres du littoral (Sierra Nevada, Pyrénées, Argentera, par exemple). La présence de ces reliefs a des conséquences sur le climat. C'est un facteur géographique majeur des bassins versants méditerranéens.

I – 2 – Caractéristiques climatiques

Le climat méditerranéen est « un climat de transition entre la zone tempérée et la zone tropicale, donc déjà subtropicale » (Estienne et Godard, 1970).

Il se caractérise par un été très chaud et un hiver doux. La quasi-totalité des pluies tombent hors de l'été et se concentrent pendant une période courte de 50-100 jours par an, avec des intensités journalières souvent fortes (1930 mm en 5 jours sur le Canigou en France en 1940, 1495 mm en 72 heures à San Cristina d'Aspromonta en Italie en 1951, (Plan Bleu, 2004). La région méditerranéenne se caractérise aussi par l'irrégularité de la précipitation, que cela soit temporellement avec des périodes de sécheresse (comme celle qui a frappé l'Espagne en 1947) et avec des périodes humides qui peuvent même engendrer des inondations (les inondation de 1969 en Tunisie), soit spatialement ; les précipitations moyennes

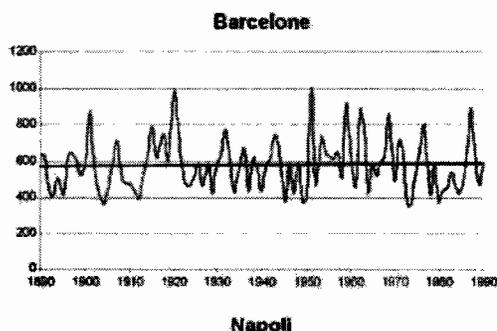


Figure 1 : variabilité pluviométrique interannuelle à Barcelone. Source : Plan Bleu

annuelles peuvent aller de quelques centimètres près du Golfe de Syrte en Libye jusqu'à 4 m ou plus sur les sommets les plus arrosés de l'ouest des Balkans (maximum 4,6 m au Monténégro), (Plan Bleu, 2004).

La variabilité des pluies est interannuelle aussi bien qu'annuelle. La figure (1) montre qu'à Barcelone la précipitation varie entre plus de 1000 mm en 1951 et 350 mm en 1973.

L'évaporation à son tour joue un rôle réductif de l'efficacité des volumes d'eau apportés par les pluies. Elle est inégalement répartie sur le bassin, passant de moins de 700 mm sur les reliefs alpestres jusqu'à 1 m dans la plus grande partie du bassin, elle atteint même 2 m dans les plaines du Sud et de l'Est (Plan Bleu, 2004). C'est pour cela que cette variabilité a des conséquences plus graves sur la rive sud vu que les précipitations y sont déjà déficitaires.

I – 3 – Caractéristiques démographiques

Ayant un climat modéré et une localisation stratégique, la région méditerranéenne est une des régions les plus peuplées du monde depuis l'antiquité. La population de l'intégralité des pays méditerranéens a été estimée à 475 millions d'habitants en 2007, soit 7,15% de l'humanité, et elle devrait atteindre 535 millions en 2020 (World population prospects, 2008).

A partir des années soixante, il y a eu des changements importants dans la carte démographique méditerranéenne, mais ces changements étaient différents entre les rives Nord et Sud. Au même temps que le taux de la croissance démographique sur la rive Nord ne cesse de diminuer à partir des années soixante jusqu'à nos jours (entre 2,986% et 0,279% en Albanie et entre 0,780% et 0,528% en Italie durant la période 1960-2005), (World Population Prospects, 2008) ; les rives Sud et Est ont vécu un autre scénario. Les pays d'Afrique du Nord ont connu une très forte augmentation de leurs populations : la population du Maghreb a été multipliée par 2,4 au cours de la période 1965-2002 passant de 29,8 à 71,2 millions (CIHEAM, 2005), et devrait dépasser 88 millions en 2020. Récemment, leur taux de croissance a commencé de diminuer, mais en Syrie, en Libye, et dans les territoires palestiniens, le taux de croissance n'a pas cessé d'augmenter (Human Development Report, 2009).

I – 4 – Caractéristiques socio-économiques

L'importance socio-économique est évidente dans tous les pays méditerranéens, l'agriculture, le consommateur le plus gourmand de l'eau, est un secteur économique essentiel dans tous ces pays. Alors que la contribution de l'agriculture au PIB dans les pays de la rive nord est relativement faible (entre 2 et 3% en moyenne), au contraire, sur la rive sud l'agriculture est un secteur économique stratégique (entre 10 et 15% en moyenne, même 23% en Syrie...), (CIHEAM, 2006). L'importance de l'agriculture se manifeste aussi par la forte proportion de la population méditerranéenne qui travaille dans ce secteur : 39 millions, soit 20% des actifs, plus simplement 1 méditerranéen sur 11. Cette proportion est même plus importante sur la rive sud : 25 à 30% de la population active (CIHEAM, 2006).

De plus de l'explosion démographique qu'a témoigné la méditerranée, le tourisme qui est un secteur économique très important pour la quasi-totalité des pays méditerranéens, joue un rôle aussi stressant sur les ressources d'eau. Comme cette région est l'une des plus privilégiée au monde pour les touristes (170 millions/an) (Plan Bleu, 2009), le secteur touristique se développe de plus en plus dans les pays méditerranéens qui se trouvent toujours en concurrence pour attirer le maximum possible des touristes... Ce développement engendre une consommation excessive en eau,

concentrée dans les zones littorales, et de plus, normalement durant l'été où les ressources en eau disponibles sont plus rares. « A l'horizon de 2025, la fréquentation touristique pourrait atteindre 637 millions dans les pays méditerranéens, dont 312 millions dans les seules régions côtières. » (Plan Bleu, 2008).

Dans ce contexte, c'est important de signaler que les touristes sont normalement beaucoup moins attentifs à leurs consommations en eau que les habitants locales, selon le World Wildlife Fund (WWF) un touriste en Espagne consomme jusqu'à quatre fois plus de l'eau qu'un citoyen espagnol...

I - 5 - Conclusion

La région méditerranéenne connaît une pénurie croissante en eau, tant de surface que souterraine. A cause de la croissance démographique et du développement des différents secteurs économiques, la demande en eau a doublé depuis 1950 pour atteindre en 2007 en moyenne 280 km³/an ; elle pourrait même atteindre 330 km³/an en 2025.

Selon les «Notes du Plan Bleu» (Plan Bleu, 2009), 180 millions de méditerranéens se trouvent en dessous du seuil de « pauvreté » en eau (moins de 1000 m³/hab./an) et 60 millions (dont les tunisiens (Le Goulven *et al.*, 2009) en dessous du seuil de « pénurie » en eau (moins de 500 m³/hab./an) en 2009. Les chiffres augmenteront pour atteindre 250 millions et 80 millions respectivement en 2025.

En raison de cette pénurie, et afin de satisfaire les demandes croissantes en eau, les bassins versants méditerranéens ont été aménagés au fil des dernières décennies par de grands ouvrages qui visaient à stocker et à redistribuer les ressources d'eau. Le Plan Bleu cite ainsi 1200 grands barrages dans le bassin méditerranéen. Dans un premier temps, ces travaux ont beaucoup contribué au développement des pays notamment ceux du Sud où la disponibilité de l'eau n'a plus été une contrainte au développement des secteurs agricole et touristique. Mais, au-delà de ces aspects positifs, les impacts sur les ressources en eau sont beaucoup à prendre avec conscience : un changement à l'échelle régionale voire -par fois- à l'échelle nationale des systèmes hydrologiques et hydrogéologique, des ruissellements qui jadis coulaient dans les vallées et alimentaient des nappes sont disparus, l'irrigation excessive en eau a abouti à une hausse des niveaux des eaux souterraine jusqu'à par fois la surface (le cas de la ville d'Al Racka en Syrie). Contrairement, dans un autre endroit la surexploitation des nappes phréatiques a abouti à une baisse importante de leur niveau, comme par exemple le cas de la plaine de Pontina en Italie Centrale (Casa *et al.*, 2008), la plaine de Haouz au Maroc Central (Abourida *et al.*, 2003), et c'est le cas aussi de la plaine de Kairouan en Tunisie...

II - Zone d'étude, la plaine de Kairouan

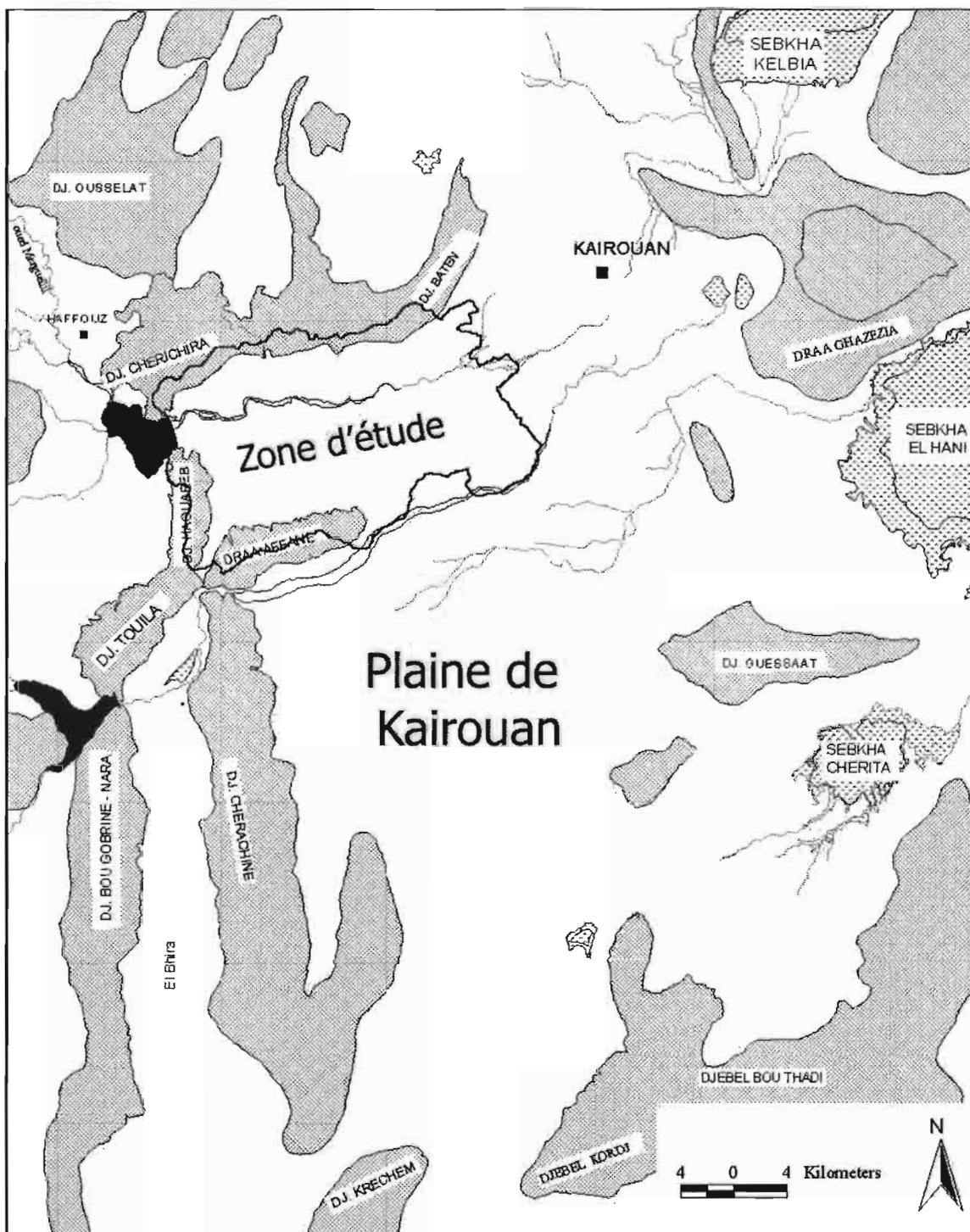


Figure 2 : Zone d'étude.

II - 1 - Contexte topographique

La plaine de Kairouan (Figure 2) se trouve en Tunisie centrale. Sa superficie de 3000 km² en fait le plus grand bassin aquifère de la Tunisie (Nazoumou, 2002 ; Besbes et de Marsily, 1976). Elle s'étend entre la ville de Kairouan et le Djebel Batten au Nord jusqu'aux Djebels Khordj et Bou Thadi au Sud, entre les Djebels Chérichira, El Haouareb, Draâ Affane, et Chérichine à l'Ouest et les sebkhas (lacs salés) d'El Kelbia, El Hani, et Chéritha à l'Est. Elle est l'exutoire de trois bassins versants qui drainent le flanc sud-est de la dorsale tunisienne : Merguellil, Zeroud, et Nebhana.

L'altitude de la plaine décroît progressivement de l'Ouest vers l'Est : 210 m au niveau du seuil karstique d'El Haouareb, 50 m dans la ville de Kairouan.

Dans cette grande plaine, la zone d'étude de ce stage définie par le projet MERGUSIE s'étend entre les latitudes 35°45' et 35°65' Nord et les longitudes 9°75' et 10°05' Est. Elle couvre une superficie d'environ 300 km². Elle est limitée à l'Ouest par le Jebel El Haouareb, au Nord par les Djebels Chérichira et Batten, au Sud par le Jebel Drâa Affane, et à l'Est par la ville de Kairouan.

II - 2 - Contexte climatique

La plaine est marquée par un climat semi-aride avec un hiver doux et un été très chaud. La température moyenne mensuelle passe de 11,5 °C en janvier à 28,7 °C en juillet et août (

Tableau 1). En plus, le Sirocco qui est un vent chaud et sec du sud/sud-ouest souffle sur la plaine en moyenne 20 jours par an engendrant une augmentation de la température jusqu'à plus de 40°C (Feuillette, 2001).

Tableau 1 : Température moyenne mensuelle (°C)

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Station de Kairouan	11,5	12,6	14,2	16,9	21,2	25,4	28,7	28,7	25,5	20,7	15,9	12,5

Source : Institut National de la Météorologie (INM) de Tunisie.

Le climat est très sec pendant l'été, et moyennement sec pendant le reste de l'année, l'humidité relative de l'air minimale en juillet 45 % et maximale en octobre 65 % (Tableau 2).

Tableau 2 : Moyenne mensuelle de l'humidité relative de l'air en %.

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Station de Kairouan	65	61	61	60	53	48	45	50	61	65	63	64

Source : Bouzaïane et Lafforgue (1986).

La faible humidité de l'air dans la plaine entraîne une forte demande évaporatoire. La moyenne annuelle de l'évapotranspiration potentielle (ET_p) mesurée à Kairouan par la formule de Penman-Monteith (Annexe 4) est de l'ordre de 1650 mm. L'ET_p est maximale pendant l'été avec plus de 40 % de l'ET_p totale et minimale en hiver (Tableau 3).

Tableau 3 : L'évapotranspiration potentielle (ET_o).

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nove.	Déce.	Moy. Ann.
ET _o [mm]	64,3	70,6	113,7	131,2	175,8	214,5	244,9	228,2	159,4	122,9	79,0	85,4	1663

La pluie moyenne annuelle mesurée à la station de Kairouan SM est d'environ 300 mm. Les précipitations sont maximales en automne et printemps (plus de 66 % de la précipitation totale) et minimales en été pendant lequel il n'y a presque plus de pluie (environ 8 % du total).

Tableau 4 : Pluie moyenne mensuelle à Kairouan (période 1925-206).

	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Octo.	Nove.	Déce.	Moy. Ann.
Pluie [mm]	24,3	22,7	35,2	28,0	22,6	8,8	4,0	11,1	37,4	43,4	29,8	29,5	296,8

De plus de la forte variabilité pluviométrique saisonnière, les précipitations ont une forte variabilité interannuelle. Elle passe d'un maxima de 620 mm en 1969-1970 à un minima de 115 mm en 1945-1946 (Annexe 5).

II - 3 - Contexte démographique

Bien que l'alimentation de l'eau potable (AEP) ne représente qu'une petite partie des prélèvements totaux, une augmentation importante de la population pourrait engendrer une augmentation remarquable des prélèvements de l'AEP.

Selon Géroutet (2004), la population du bassin versant de Merguellil possède une croissance régulière. En effet, au cours des dernières décennies la population de la plaine de Kairouan a connu une forte augmentation. Pendant la période de 1975 à 1994, la population de la délégation de Chébika (partie centrale de la zone) a presque doublé. A l'échelle du bassin versant du Merguellil, selon le recensement de 1994, la population était estimée à 102600 habitants dont 85% habitent dans le gouvernorat de Kairouan. Cependant, le dernier recensement de 2004 montre que la croissance de toutes les délégations du bassin versant de Merguellil a été ralentie.

II - 4 - Contexte géologique et hydrogéologique

Le bassin versant du Merguellil est endoréique (Leduc et Virrion, 2007). La plaine de Kairouan correspond à une cuvette effondrée dont le remplissage détritique continental plio-quadernaire peut dépasser 700m (Nazoumou et Besbes, 2001).

Les alluvions les plus grossières (sables et graviers) se concentrent aux débouchés des oueds dans la plaine alors que les alluvions de texture moyenne et fine sont entraînées plus à l'aval (Figure 3), annexes (6, 7, 8, 9, 10).

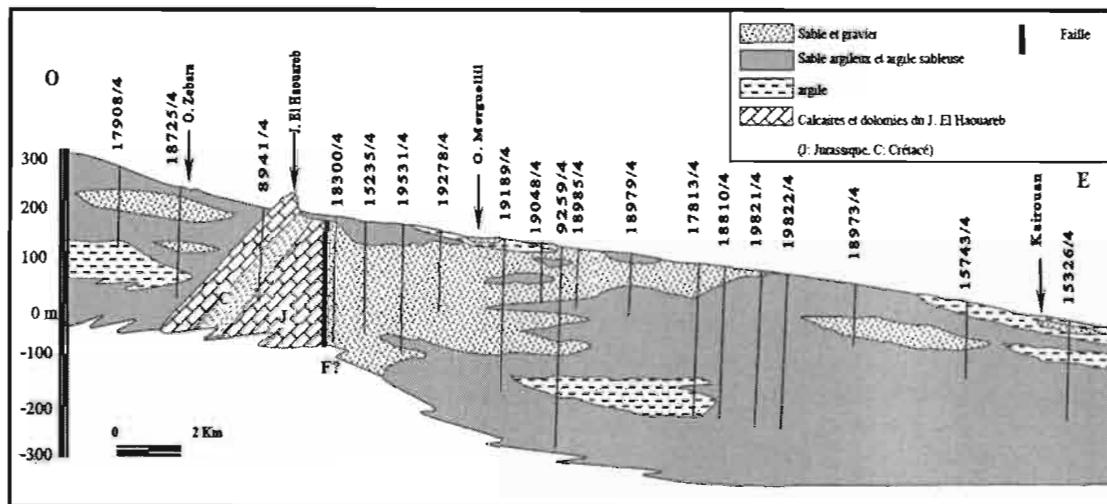


Figure 3 : Coupe lithologique le long du sous-bassin aval du Merguellil (Ben Ammar, 2007)

Le profil vertical de la plaine révèle des couches sédimentaires lenticulaires, qui se divisent en deux catégories : les couches perméables et aquifères (sables, grès, conglomérats), et les couches imperméables (marnes et argiles). Ces couches se superposent alternativement. D'un point de vue hydrogéologique, et selon Besbes et de Marsily (1976), ces couches-là sont considérées comme une seule nappe unique jusqu'à environ 100 m de profondeur. C'est ici que les auteurs distinguent une nappe profonde d'une épaisseur de 50 à 100 m et dont la profondeur varie entre 100 et 400 m. Cette configuration s'observe sur l'ensemble de la plaine, sauf dans la zone de Nord-Ouest à l'aval du bassin amont de Merguellil où les nappes phréatique et profonde se confondent, et en aval de la plaine, où la nappe profonde alimente la nappe phréatique drainée par les sebkhass (Nazoumou, 2002).

Par une réinterprétation des essais de pompage, Aouadi (2006) a montré que la transmissivité dans la plaine varie entre 10^{-3} et $27 \cdot 10^{-3}$ m²/s, avec un maximum dans le Sud du sous-bassin aval du Merguellil entre les deux oueds Merguellil et Zeroud (Annexe 11). Il a signalé que la forte variation de la distribution spatiale de la transmissivité témoigne d'une forte hétérogénéité des sédiments horizontalement ou verticalement.

Concernant les propriétés physiques de l'aquifère, nous n'avons pas pu en construire une idée très claire, ce qui était dû à un manque d'assez de document en disposition. Par exemple, nous n'avons pas trouvé des valeurs de la porosité du sol, qui est une des propriétés les plus importantes pour évaluer les variations des stocks d'eau suite aux variations des niveaux de la nappe phréatique. Pourtant, des essais de pompage ont été faits dans la plaine depuis une quarantaine d'années (Besbes, 1971).

Nous n'avons ainsi trouvé que deux références donnant des valeurs de la porosité : dans la thèse de Nazoumou (2002), les valeurs du coefficient d'emmagasinement de la nappe aquifère sont comprises entre 5 et 10 % ; dans un rapport de la Direction Générale des Ressources en Eau de la Tunisie (DGRE, 1993), le coefficient d'emmagasinement retenu est de 12% (déduit des essais des pompages sans mentionner la source).

II – 5 – Les ressources d'eau et leur évolution

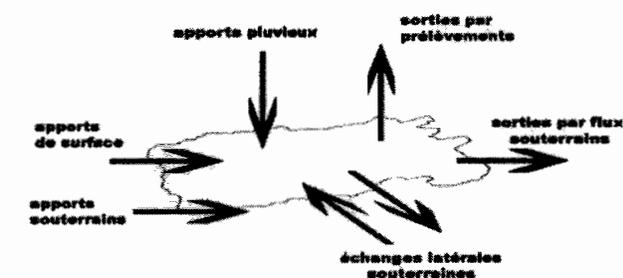
L'estimation des prélèvements nécessite la connaissance du bilan hydrique de la nappe ainsi que la connaissance de l'évolution des composantes de ce bilan dans le temps et dans l'espace. Ceci permet de mieux identifier les facteurs principaux dont l'évolution affecte le plus le comportement de la nappe, et d'identifier par conséquent l'effet de l'évolution de l'agriculture sur l'évolution des ressources en eau.

Dans le sous-bassin aval du Merguellil, le bilan hydrique actuel de la nappe de Kairouan se différencie du bilan hydrique en régime naturel avant la construction du barrage El Haouareb par rapport aux apports à la nappe en provenance du sous-bassin amont du Merguellil (Figure 4).

En régime naturel

La nappe phréatique de la plaine était alimentée par les crues de l'oued Merguellil. La majeure partie des eaux arrivant à la plaine lors de fortes crues rejoignait la sebkha Kelbia à l'extrémité Est de la plaine (Figure 2). Les plus petites crues disparaissaient dans la plaine par évaporation ou par infiltration. Besbes et de Marsily (1976) estiment la contribution des crues de l'oued du Merguellil à l'alimentation de la nappe de Kairouan à $12,6 \text{ Mm}^3/\text{an}$, à comparer avec un apport souterrain estimé en régime naturel à $7 \text{ Mm}^3/\text{an}$ pour l'oued Merguellil (Besbes et de Marsily, 1976 ; Nazoumou et Besbes, 2001). L'apport de l'amont du bassin du Merguellil à la nappe de Kairouan était donc estimé à environ $20 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en régime naturel.

Avant la construction du barrage d'El Haouareb



Après la construction du barrage d'El Haouareb

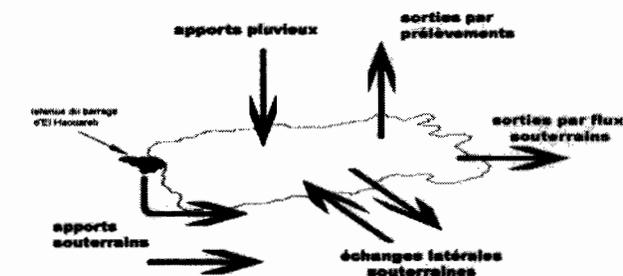


Figure 4 : Bilan hydrique de la nappe avant et après la construction du barrage El Haouareb.

Après la construction du barrage d'El Haouareb

En vue de protéger la ville de Kairouan suite aux crues dévastatrices de 1969, l'Etat tunisien a construit deux grands barrages sur les oueds Zeroud et Merguellil : Sidi Saâd en 1982 au débouché de l'Oued Zeroud, et El Haouareb en 1989 à la sortie du bassin versant amont de Merguellil. Il n'est donc plus possible de parler d'un régime naturel d'alimentation puisque les bassins amont ont été verrouillés et que l'alimentation de la nappe de Kairouan au niveau du sous-bassin aval du Merguellil se fait par écoulements souterrains à travers le seuil karstique d'El Haouareb.

Les écoulements souterrains qui traversent le seuil d'El Haouareb viennent de deux origines : les eaux de la nappe d'Aïn El Beidha et les eaux infiltrées de la retenue du barrage. Nazoumou (2002) a estimé la contribution de la nappe d'Aïn El Beidha à l'alimentation de la nappe de Kairouan à environ $3,8 \text{ Mm}^3/\text{an}$. Plus tard elle a été estimée autour de $5 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (Kingumbi *et al.*, 2004 ; Le Goulven *et al.*, 2009). Virrion (2006-a) estime la contribution de la nappe d'Aïn El Beidha à un maximum de $7,5 \text{ Mm}^3/\text{an}$ pendant la période 1989-2004.

D'un autre côté, les eaux infiltrées dans le barrage El Haouareb sont estimées par Nazoumou (2002) à $26 \text{ Mm}^3/\text{an}$ en moyenne pendant la période 1989-1998. Le Goulven *et al.* (2009) proposent le chiffre de $14,3 \text{ Mm}^3/\text{an}$, en bonne corrélation avec la valeur de $14 \text{ Mm}^3/\text{an}$ de Kingumbi *et al.*

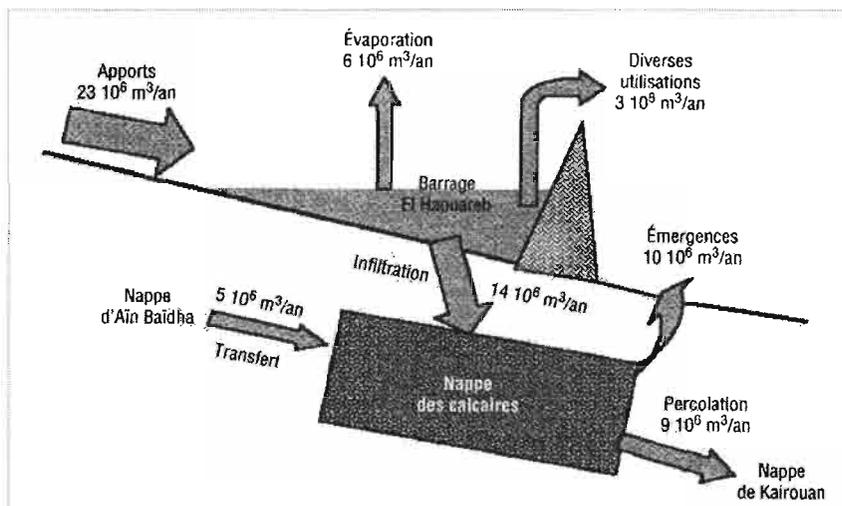


Figure 5 : Bilan en eau du système d'El Haouareb pendant la période 1989-1999. (Kingumbi *et al.*, 2004)

(2005) ou le maximum de $16,5 \text{ Mm}^3/\text{an}$ de Virrion (2006-a).

Donc, à l'exception de Nazoumou (2002), l'alimentation de la nappe de Kairouan au niveau du seuil karstique d'El Haouareb a été estimée entre 19 et $20 \text{ Mm}^3/\text{an}$, dont presque 73% proviennent de la retenue d'El Haouareb par infiltration, et le reste provient de la nappe d'Aïn El Beidha. Cette répartition a été confirmée par des analyses isotopiques faites par Ben Ammar *et al.* (2006).

Après le seuil d'El Haouareb, les eaux infiltrées prennent deux chemins : soit elles retournent en surface en aval direct du barrage (émergence), soit elles rechargent la nappe par percolation.

Le débit d'émergence au pied du barrage est estimé à une moyenne annuelle de $10 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (Kingumbi *et al.*, 2004), pouvant varier entre 8 et $14 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (Nazoumou, 2002 ; ¹CRDA ; Virrion, 2006-a).

Concernant les apports de précipitation, la littérature n'est pas unanime quant à la possibilité d'une contribution à la recharge de la nappe souterraine par les eaux de pluies. Alors que Besbes et de Marsily (1976) estiment l'infiltration directe des pluies à $6 \text{ Mm}^3/\text{an}$, due aux ruissellements concentrés grâce aux ravins des piedmonts des reliefs, les analyse géochimiques récentes confirment cette contribution mais la considèrent négligeable (Ben Ammar *et al.*, 2006 ; Ben Ammar *et al.*, 2009).

La littérature ne mentionne pas de quantification des échanges latéraux avec les nappes adjacentes ni des sorties en eaux souterraine vers les sebkhas. Seul Chaieb (1990) a supposé une contribution par infiltration dans le lit de l'oued Chérichira à $1,2 \text{ Mm}^3/\text{an}$.

¹ CRDA : Commissariat Régionale du Développement Agricole (chiffre cité par Feuillette, 2002)

Dans les différentes composantes du bilan hydrique contribuant à l'alimentation de la nappe du sous-bassin aval du Merguellil, ce sont les écoulements souterrains à travers le seuil d'El Haouareb qui représentent, et de loin, la principale source d'alimentation en eau de la nappe. La connaissance de l'évolution de ces écoulements est ainsi importante pour savoir leurs impacts sur l'évolution de la surface de la nappe.

Un facteur important influençant les apports à la nappe est l'envasement de la retenue d'El Haouareb. Pendant les 10 premières années après la mise en eau du barrage, le volume total des sédiments envasant la retenue a été évalué à environ 13 Mm³ (Garetta et Ouerghemmi, 1998 ; Tchatagba, 1998). On pourrait craindre une diminution progressive de la capacité du stockage du barrage, et par conséquent une diminution des apports par infiltration. Kingumbi *et al.* (2004) ont évalué que les pertes des eaux de la retenue par infiltration étaient passées de 20,5 Mm³ en 1989 à 9,8 Mm³ en 1998, avec une moyenne de 14 Mm³/an soit 60% des pertes totales de la retenue. Virrion (2006-b) a évalué le volume des dépôts qui seraient été cumulés dans la retenue pendant la période 1989-2006 à 26 Mm³/an. A cause de l'envasement, les pertes par infiltration de la retenue en 2006 ne représentaient que 52 % des pertes totales (Virrion, 2006-a).

Les prélèvements en eau pour l'agriculture sont considérés comme le principal facteur de la surexploitation de la nappe (Leduc et Virrion, 2007). Ils ont évolué d'une manière progressive avec l'évolution de l'agriculture dans la région depuis les années 1970. En effet, suite aux politiques gouvernementales qui visaient à développer le secteur agricole dans la plaine, le premier périmètre public d'irrigation (PPI) était créé dans la délégation de Chébika dans les années 1970. Durant les années 1980, en vue d'encourager les exploitations privées, l'état tunisien a lancé un programme de subvention des puits privés et leur nombre a rapidement augmenté : ils seraient environ 5000 dans le bassin (Feuillette, 2001 ; Leduc et Virrion, 2007) alors qu'ils étaient seulement 100 dans les années 1960. Ils représentent la principale source d'irrigation pour 70 % des territoires de la plaine de Kairouan en 2007. Albouchi (2006) estime que les prélèvements pour l'irrigation sont passés de 19 Mm³/an à 43 Mm³/an durant la période de 1993 à 2003 soit une augmentation de 126 %. Selon Poussin *et al.* (2008) les prélèvements sont de l'ordre de 46 Mm³/an.

Plus récemment, en essayant de freiner la surexploitation de la nappe, l'état tunisien a commencé à inciter les agriculteurs à réduire leurs consommations en subventionnant l'utilisation des techniques d'économie d'eau (irrigation au goutte à goutte), mais on a en fait observé une augmentation des prélèvements en eau suite à la généralisation de l'irrigation au goutte à goutte parce que avec leurs économies en eau, les agriculteurs étendent les surfaces irriguées (Feuillette, 2001 ; Poussin *et al.*, 2008).

III - Analyse de l'évolution des prélèvements

Dans cette partie nous allons analyser les chroniques piézométrique en les comparant avec les fluctuations des apports. Le but de cette comparaison est d'identifier les zones où la piézométrie a une évolution qui est différente de celle des apports. En suivant l'hypothèse qu'il n'y a que deux sources de perturbation sur le signal piézométrique capté : Les écoulements souterrains et le pompage, cette différence de comportement entre la piézométrie et les apports peut être liée à l'effet de pompage.

Dans ce qui suit, nous allons présenter dans un premier temps les mesures d'observations de la nappe dont nous disposons. Dans un deuxième temps, avant de commencer les analyses, nous allons discuter les facteurs susceptibles d'influencer la piézométrie.

III - 1 - Données disponibles

III - 1 - 1 - Réseau de surveillance

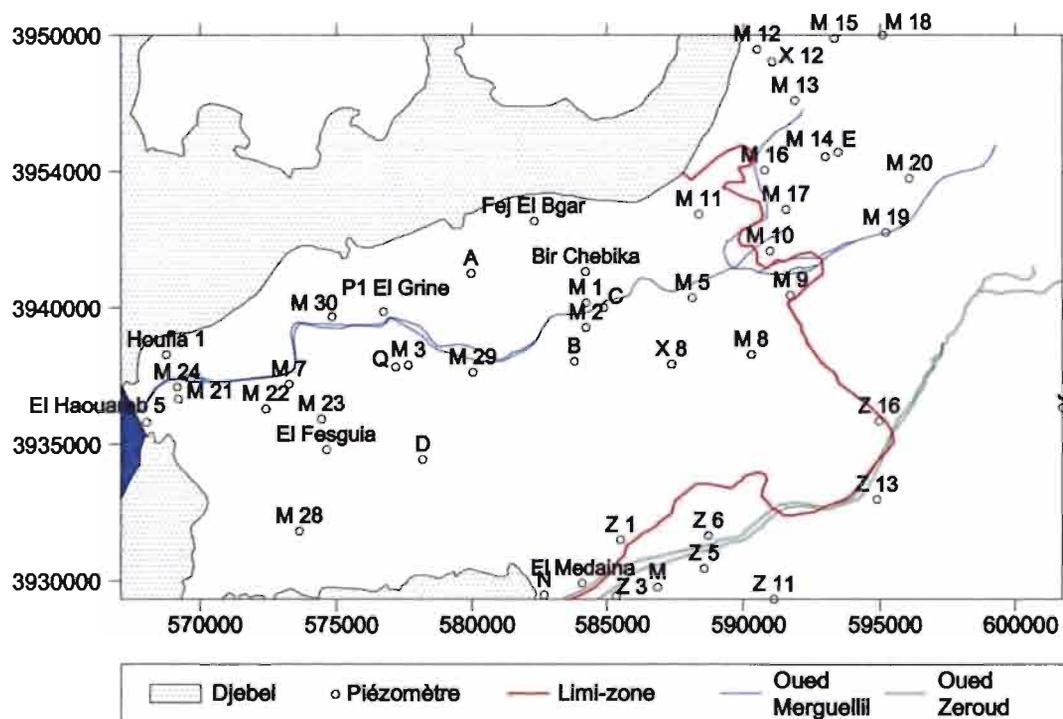


Figure 6 : Réseau de surveillance dans le sous bassin aval du Merguellil.

L'observation de l'évolution de la nappe se fait par un réseau de surveillance composé des piézomètres dispersés dans la plaine avec une densité variable. La première de ce réseau est composée des piézomètres localisés le long de l'oued du Merguellil ; ils sont actuellement 20 en activité (Annexe 12). Le piézomètre le plus près du barrage est celui d'El Haoaureb5, alors que celui le plus loin à l'intérieur de la zone d'étude est le M11bis à environ 22 km du barrage. La deuxième partie du réseau se trouve dans le Sud de la zone d'étude autour de l'oued Zeroud à l'Est du Draâ Affane. Elle est composée actuellement de 9 piézomètres. Le reste de la zone qui se trouve entre ces

deux parties n'est quasiment plus observé, surtout vers le Sud-ouest où il n'y a qu'un seul piézomètre en activité, M28.

Parmi les points de surveillance disponibles actuellement, ce sont ceux de la première partie qui nous intéressent le plus, puisque la nappe au niveau des piézomètres du Sud est alimentée plutôt par les eaux de l'oued Zeroud, donc loin de l'influence du barrage.

L'observation des niveaux de la nappe a commencé vers la fin des années 60, mais seulement deux piézomètres ont continué à fonctionner jusqu'à nos jours (M21, M22). Les autres piézomètres ont soit été détruit par les inondations de 1969 comme M3 par exemple, soit ont cessé de fonctionner plus tard pour d'autres raisons, comme M1, M5, M8 par exemple. Une partie de ces piézomètres abandonnés a été remplacée par d'autres piézomètres installés juste à côté et portant les mêmes noms que ceux qu'ils avaient remplacés mais avec le suffixe -bis. La plupart des piézomètres qui se trouvent dans la partie médiane et Est de la zone d'étude appartiennent à cette catégorie. Enfin, certains piézomètres remplaçants ont eux-mêmes été remplacés de nouveau ; ils portent alors le suffixe -ter, comme M23ter et Z3ter par exemple.

La figure (7) rassemble toutes les chroniques piézométriques des piézomètres qui sont actuellement en activité et de ceux qui ont été remplacés. Les périodes de fonctionnement de l'ensemble des piézomètres sont indiquées en annexe (12).

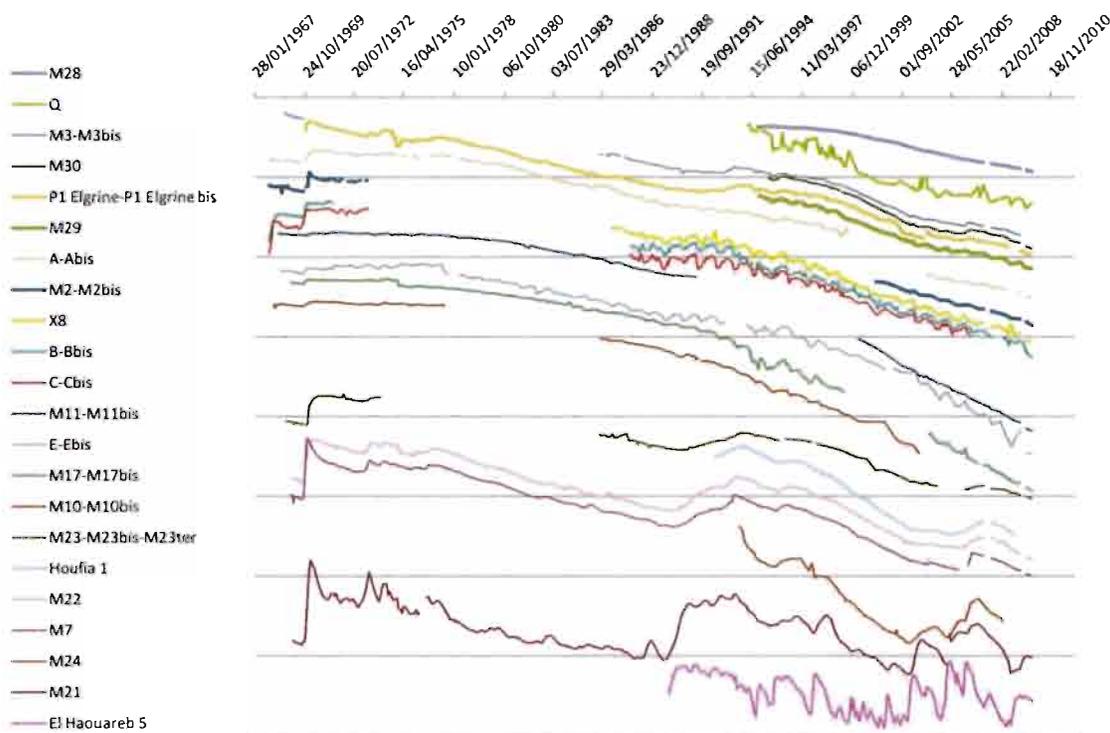


Figure 7 : Les cotes observées pendant la période 1967-2010.

* L'axe vertical n'exprime pas l'altitude réelle, les piézomètres sont rangés en fonction de la pente moyenne.

III – 1 – 2 – Anomalies

En observant les chroniques piézométriques, de nombreuses valeurs (par fois périodes d'observations) se sont révélées fausses. Nous avons trouvé important exclure ces valeurs pour qu'elles ne perturbent pas nos analyses. Nous en citons quelques exemples dans ce qui suit

Exemple 1, piézomètre P1 Elgrine bis (Figure 8).

La chronique de P1 Elgrine bis est perturbée pendant la période 09/08 au 27/10/2008 (2 observations). La comparaison avec les piézomètres adjacents (Abis, Q, M3bis, M30, M29) ne montre aucune hausse piézométrique à proximité. Cette hausse semble être une erreur de mesure et a été supprimée. Il en est de même pour M29, M30 et Abis. Le piézomètre Q a un comportement toujours anormal, nous l'avons donc complètement éliminé.

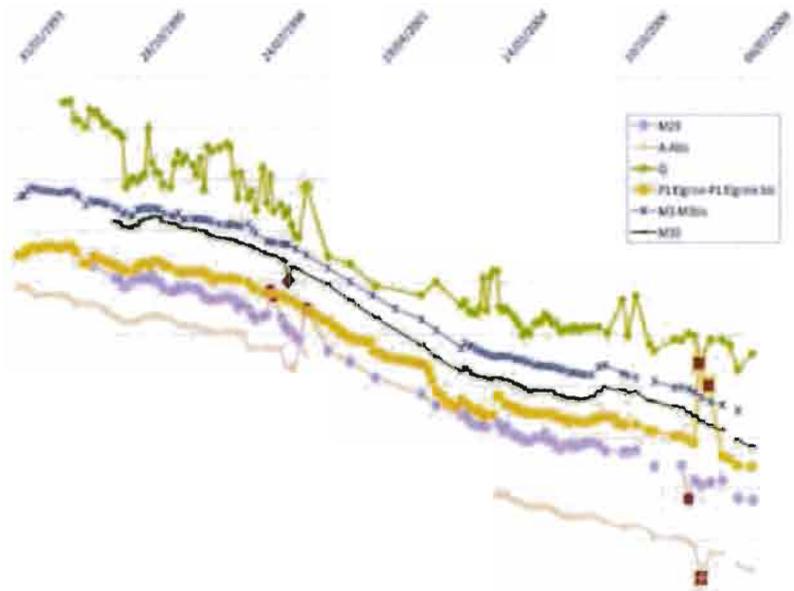


Figure 8 : Données supprimées des chroniques des piézomètres M29, Abis, P1 Elgrine, et M30.

Exemple 2, piézomètre M10bis (Figure 9).

Dans ce cas, nous avons supprimé les données postérieures au mois de septembre 2003.

Les mesures pendant cette période ne représentaient pas la vérité surtout à partir du mois d'août 2008 où la stagnation observée ne coïncidait avec aucune période de stagnations sur les piézomètres adjacents (M17bis, M11bis), ni avec aucune autre chronique pendant la même période.

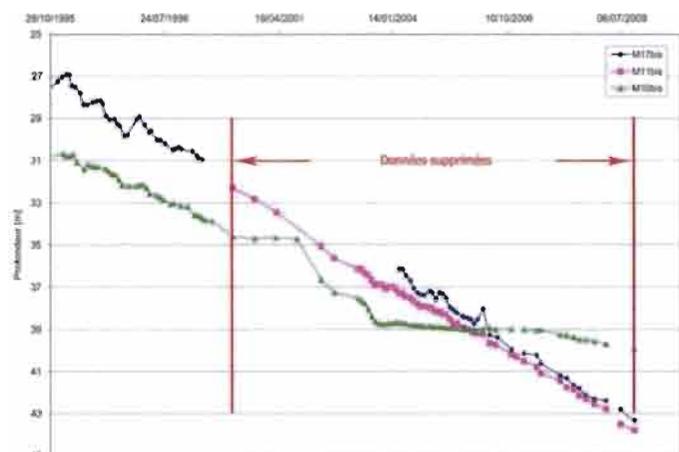


Figure 9 : Données supprimées de la chronique de M10bis.

III – 2 – Analyse de la piézométrie

Dans cette partie nous allons aborder les éléments censés influencer le comportement de la nappe. A Savoir les apports à la nappe par écoulements souterrains et la consommation de l'eau par l'agriculture. Mais d'abord, nous allons muner une discussion sur l'effet possible que la pluie peut avoir sur la piézométrie.

III – 2 – 1 – Discussion de l'influence de la pluie

Dans la partie (II – 5) nous avons signalé que des études avaient affirmé que les pluies avaient une participation très limitée voire négligeable sur la recharge de la nappe de Kairouan (Ben Ammar, 2006 ; Ben Ammar, 2009). La différence importante entre la pluie et l'évapotranspiration à l'échelle mensuelle (Figure 10) confortent de telles conclusions. Dans cette partie nous allons essayer de revérifier la possibilité d'une recharge de la nappe par l'infiltration des eaux des pluies en faisant une comparaison entre les chroniques de pluies et l'évapotranspiration potentielle (ET_0) à l'échelle journalière et si une infiltration occasionnelle pourrait recharger la nappe.

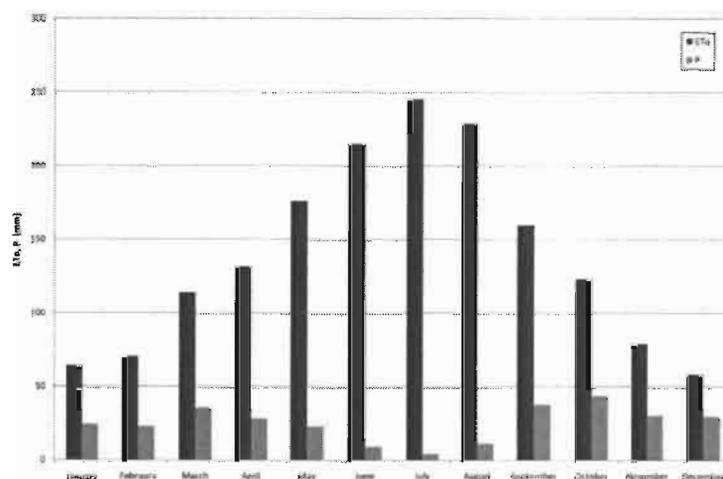


Figure 10 : Moyennes mensuelles de l'ET0 et de la pluie à Kairouan.

Cette comparaison porte sur la période postérieure à la construction du barrage El Haouareb en 1989 jusqu'en 2009. Pour ce faire, nous avons utilisé les chroniques pluviométriques disponibles enregistrées aux stations indiquées dans la figure (11), qui ne couvraient pas toute la période 1989-2009 (Tableau 5). Par ailleurs, certaines d'entre elles avaient des lacunes de quelques mois à plusieurs années (Messoudia Chébika, Chérichira école, Kairouan.SM).

La seule station ayant des mesures pour la totalité de la période est la station du barrage El Haouareb.



Figure 11 : Stations météorologiques dans le sous bassin aval du Merguellil.

Tableau 5 : Chroniques pluviométriques disponibles.

Station	Début	Fin	Station	Début	Fin
Aïn Grab	01/12/1998	31/08/2006	Kairouan.HER	01/09/1996	31/08/2006
Barrage El Haouareb	15/09/1989	16/05/2009	Kairouan.SM	01/07/1925	30/08/2006
Chérichira Ecole	01/11/1964	31/08/2006	Zbara	01/09/1999	31/08/2006

Pour résoudre le problème des lacunes, et pour tester l'homogénéité des chroniques pluviométriques à fin d'en avoir une seule chroniques qui sera représentatives de la pluviométrie dans la zone d'étude, nous avons choisi d'appliquer la méthode des résidus cumulatifs sur ces chroniques.

La méthode est expliquée dans une publication de la FAO (FAO, 1998). Elle teste la distribution des résidus cumulés (E_i), qui sont issus de la comparaison entre les valeurs originales (y_i) d'une première population (Y) (les enregistrements d'une première station pluviométrique) et les valeurs prédites (\hat{y}_i) de la même population, qui sont obtenus à leur tour par une régression linéaire par rapport à une deuxième population (X), (les enregistrements d'une deuxième station pluviométrique). Deux stations sont bien corrélées quand les résidus se localisent en totalité ou quasi-totalité dans une « ellipse de confiance » qui représente les limites maximales que les résidus cumulés ne doivent pas dépasser. Nous invitons le lecteur à consulter la publication de la FAO pour plus de détails sur cette méthode.

Les figures 12 et 13 montrent un exemple de l'application de cette méthode pour tester l'homogénéité entre les mesures de la précipitation de Chérichira école et du barrage El Haouareb pendant la période 01/1996-08/2006.

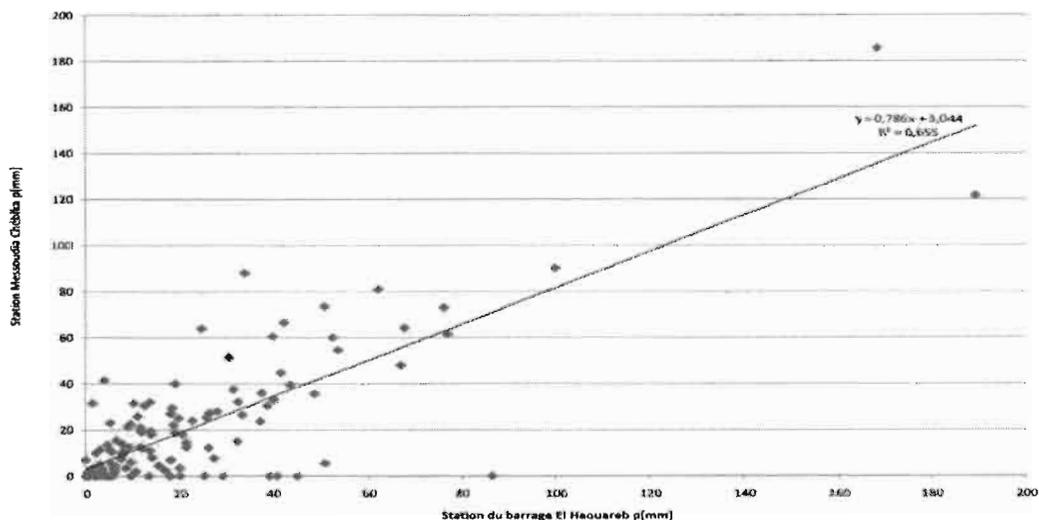


Figure 12 : Corrélation linéaire entre les stations du barrage El Haouareb et de Chébika école.

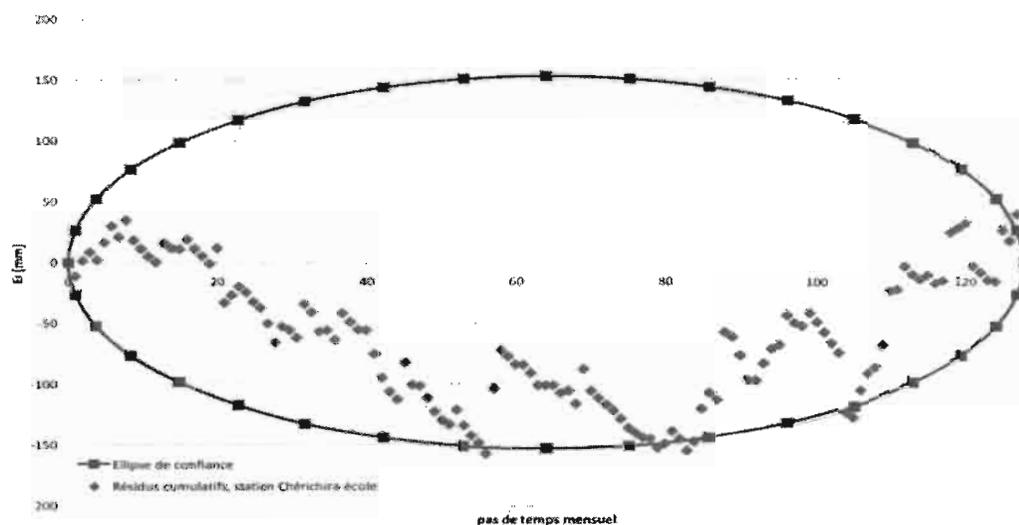


Figure 13 : Test d'homogénéisation des chroniques pluviométriques enregistrées aux stations Chérichira école et barrage El Haouareb.

La localisation des résidus cumulés par rapport à l'ellipse de confiance montre que les mesures de précipitations faites sur les deux stations sont assez homogènes, malgré l'existence d'un certain nombre de valeurs qui se situent hors de l'ellipse.

L'application de cette méthode sur le reste des stations du sous-bassin aval du Merguellil par rapport à celle du barrage El Haouareb figure en annexes (13, 14, 15, 16, 17, 18). Les résultats étaient très satisfaisants pour les stations de Kairouan HER et de Kairouan SM, moins satisfaisants pour la station de Messoudia Chébika, où pas mal de valeurs débordaient de l'ellipse de confiance, mais cela n'empêchait pas l'existence d'une bonne corrélation entre les deux chroniques. Nous pouvons donc considérer les mesures de pluie de la station du barrage El Haouareb comme représentatives de la pluviométrie de la zone d'étude.

Après avoir défini une chronique pluviométrique représentative de la pluviométrie dans la zone d'étude, nous l'avons comparé avec l'évapotranspiration potentielle à un pas de temps journalier pour voir s'il y a possibilité de recharge de la nappe par la pluie suite à des événements pluvieux importants. L'approche de cette comparaison est montrée dans la figure (14).

Pour chaque jour (i), l'évapotranspiration potentielle (ET_{0i}) a été soustraite de la pluie (P_i). Ensuite, le stock d'eau dans le sol $S_i = S_{i-1} + P_i - ET_{0i}$ a été comparé avec la réserve facilement utile (RFU) du sol. Dans le cas où $S_i \leq RFU$, la pluie n'est pas capable de percoler vers la nappe et de la recharger. Au contraire, quand

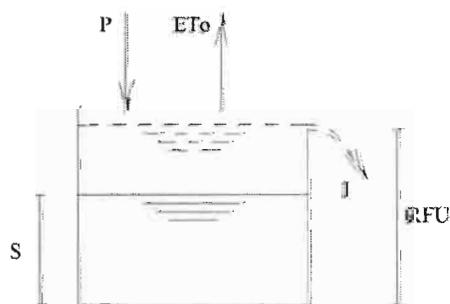


Figure 14 : Infiltration des eaux de pluie vers la nappe.

$S_i > RFU$, excès de pluie $I_i = S_i - RFU$ est supposé pouvoir s'infiltrer et contribuer à la recharge de la nappe.

La valeur de la RFU est inconnue sur le terrain. Deux valeurs arbitraires ont été retenue pour des sols variant entre sableux et argileux sableux : 60 et 85 mm (Irrigation - guide pratique -, 2003). Les résultats des calculs sont montrés dans la figure suivante.

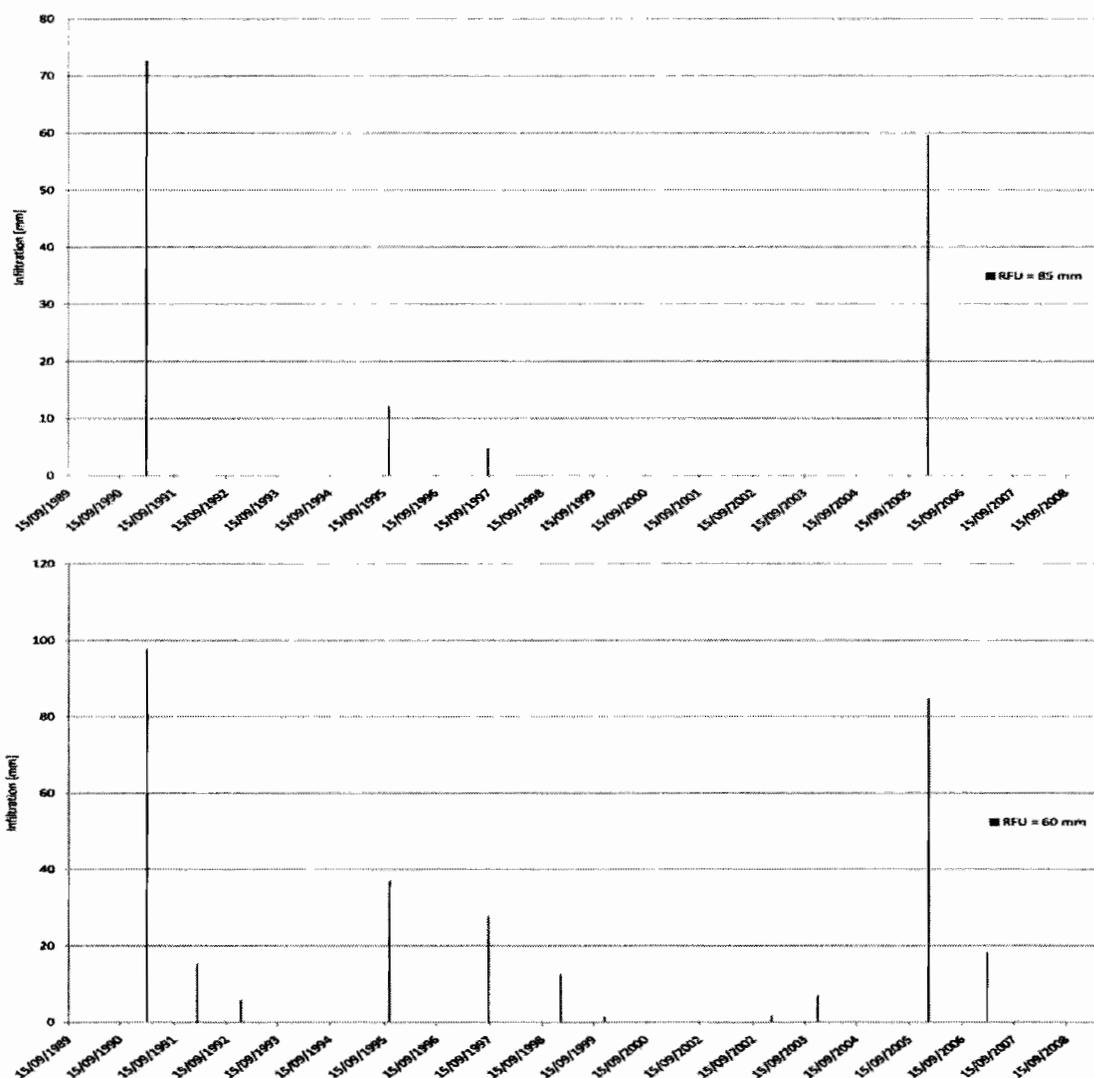


Figure 15 : Recharge probable par les pluies.

Au cours des vingt dernières années, il y a eu de plusieurs reprises où le stock d'eau a été supérieur à la RFU, et donc il s'est probablement infiltré de l'eau vers la nappe. La figure (15) montre que pendant la période 1989-2009, l'infiltration a eu lieu à 5 reprises pour RFU = 85 mm, et à 15 reprises pour RFU = 60 mm. Les évènements pluvieux les plus importants qui auraient pu engendrer une infiltration vers la nappe étaient le 15/03/1991 avec une hauteur précipitée de 104 mm, et le 21/01/2006 avec 128 mm de précipitation. Pour les deux évènements, les quantités calculées des eaux infiltrées étaient entre 70 et 95 mm pour une RFU égale à 85 et à 60 mm respectivement.

L'infiltration n'est pas proportionnelle à la précipitation, ce qui est normal dans une zone semi-aride où les pluies sont très irrégulières et orageuses. En effet, plus la pluie est forte, plus il est probable d'avoir de l'infiltration, mais la quantité d'eau infiltrée dépend d'un facteur très important qui est le stock d'eau initial du sol. C'est pour cela que dans la figure (16) nous remarquons que par exemple pour les deux valeurs de pluie 33 et 38,9 mm l'infiltration était de 27,7 et de 12,35 mm pour une RFU de 60 mm, et également de 4,75 et de 0 mm pour une RFU de 85 mm.

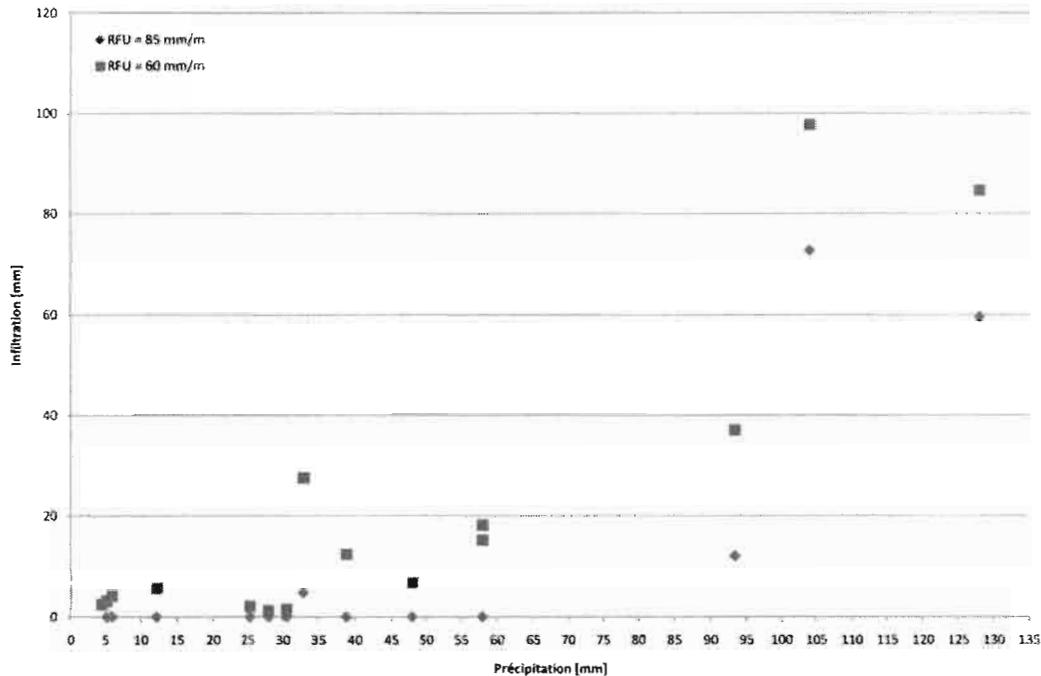


Figure 16 : Relation précipitation-infiltration.

L'analyse précédente montre que la pluie aurait pu contribuer à la recharge de la nappe. Néanmoins, nous ne sommes pas sûrs si les calculs des volumes d'eaux infiltrées correspondent à ce qui s'est vraiment passé, puisque nous ne disposons pas de valeurs de la RFU du sol. Cependant, pour les deux événements pluvieux au 15/03/1991 et au 21/01/2006 nous pouvons imaginer que les quantités précipitées étaient assez importantes d'une telle sorte qu'elles aient pu s'infiltrer vers la nappe. Par conséquent, durant les analyses qui suivent, des perturbations de la piézométrie à ces deux dates pourraient être reliées à l'effet de pluie.

III – 2 – 2 – Représentation des apports

Comme indiqué dans la partie (II – 5), les études antérieures proposaient que la source quasiment unique d'alimentation de la nappe de Kairouan au niveau du sous-bassin aval du Merguellil était les écoulements souterrains à travers le seuil d'El Haouareb, en provenance de la nappe d'Ain El Beidha et de la retenue par infiltration.

Les volumes arrivant de la nappe d'Ain El Beidha étaient présumés constants de l'ordre de 5 Mm³/an en moyenne. Concernant les volumes infiltrés de la retenue d'El Haouareb et qui arrivent à la nappe, ils varient en fonction du stock de l'eau derrière le barrage. Kingumbi *et al.* (2004) ont proposé par

une étude du bilan hydrique de la retenue sur les dix premières années qui ont suivi la mise en eau du barrage, que les volumes infiltrés entrant à la nappe étaient une fonction linéaire de la hauteur de l'eau stockée, et que ces volumes diminuaient avec le temps à cause de l'envasement (Figure 17).

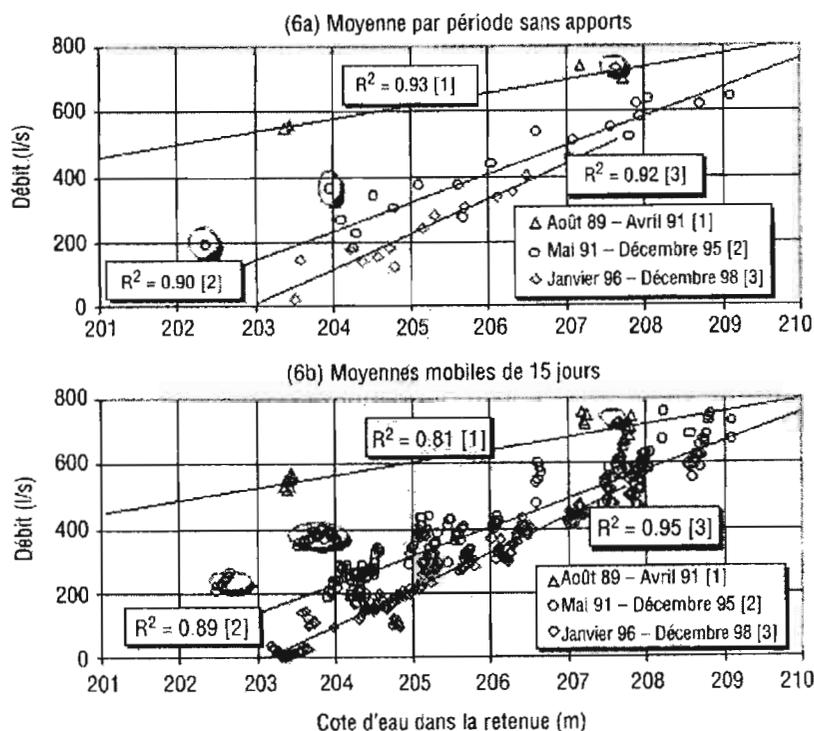


Figure 17 : Débits infiltrés en fonction de la cote d'eau dans la retenue d'El Haouareb. (Kingumbi et al., 2004)

Dans une étude plus récente du bilan d'eau de la retenue utilisant les données de la période 1989-2004, Virrion (2006-a) n'a pas confirmé l'hypothèse de la linéarité de la relation entre les cotes d'eau et l'infiltration. Selon lui la tranche d'eau infiltrée ne dépendait pas de la hauteur du niveau d'eau.

En effet, les deux études ont utilisé la même méthode d'un bilan hydrique d'une retenue. Les paramètres du bilan étaient les mêmes, sauf que Kingumbi et al. (2004) ont intégré le terme de l'alimentation par les eaux de la nappe d'Aïn El Beihda dans le bilan, alors que ce terme était absent dans le bilan de Virrion (2006-a), ce qui suggère qu'il l'avait considéré non variable.

N'ayant pas fait d'évaluations de la relation cotes d'eau-infiltration, nous considérerons cette relation linéaire. La comparaison entre les variations de la cote de la retenue et les niveaux de la nappe observés au piézomètre El Haouareb 5 montre que ces deux derniers sont très bien corrélés (Figure 18). Le calcul du coefficient de corrélation entre la chronique piézométrique d'El Haouareb5 et de la cote de la retenue a donné une corrélation de plus de 90%, (description plus détaillée dans la partie *Méthode de la corrélation croisée*).

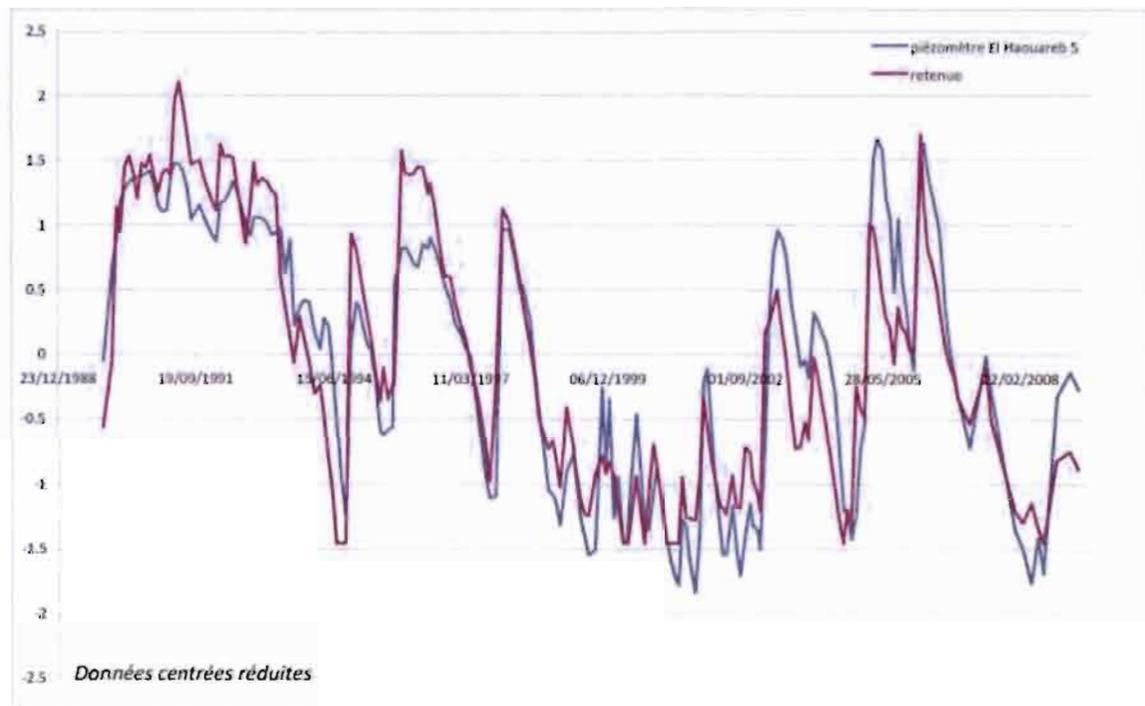


Figure 18 : Corrélogramme des observations du piézomètre El Haouareb et de la retenue.

La figure (18) montre que l'évolution de la surface de la nappe suit celle de la cote de la retenue. Cette similitude du comportement des chroniques nous amène à considérer que les eaux qui s'infiltrent, et par conséquent les apports à la nappe, sont en relation linéaire avec les cotes de la retenue.

D'un autre côté, l'hypothèse que les volumes provenant de la nappe d'Aïn El Beidha soient constants, et la linéarité de relation entre les cotes observée de la retenue et les débits infiltrés, nous permet de considérer que les variations de la cote de la retenue soient représentatives, d'une manière aussi qualitative que quantitative, des variations des apports à la nappe, et nous permet par la suite de les utiliser dans les comparaisons avec les chroniques piézométriques de la nappe.

III - 2 -3 - Représentation des prélèvements

Les prélèvements pour l'agriculture, ils varient au cours de l'année cours de l'année en fonction du besoin en eau de chaque type de plante, de la durée et de la saison de sa culture, et de la densité des cultures selon chaque secteur. Par conséquent, dans une partie de la plaine où les volumes pompés seraient importants, des fluctuations de la piézométrie commencent à s'observer. Celles-ci ont une saisonnalité qui est différente de celle des apports. Autrement dit, dans une zone où le pompage influence la piézométrie, les périodes de l'année où la nappe se trouve à ses niveaux les plus bas et les plus hauts ne coïncideraient pas forcément avec les périodes où il y aura le maximum et le minimum d'apport à la nappe. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des cultures pratiquées dans la plaine pour avoir une meilleure idée de l'évolution des prélèvements.

A cet effet, deux typologies ont été faites dans la plaine pour identifier les cultures pratiquées (Feuillette, 2001) ainsi que pour identifier toutes les exploitations agricoles, y compris l'élevage (Poussin *et al.*, 2008), pour estimer par la suite la consommation en eau. Les résultats de ces typologies ont été représentés par l'environnement de modélisation « ZonAgri », fait par l'équipe de l'UMR G-eau de Montpellier (Figure 19).

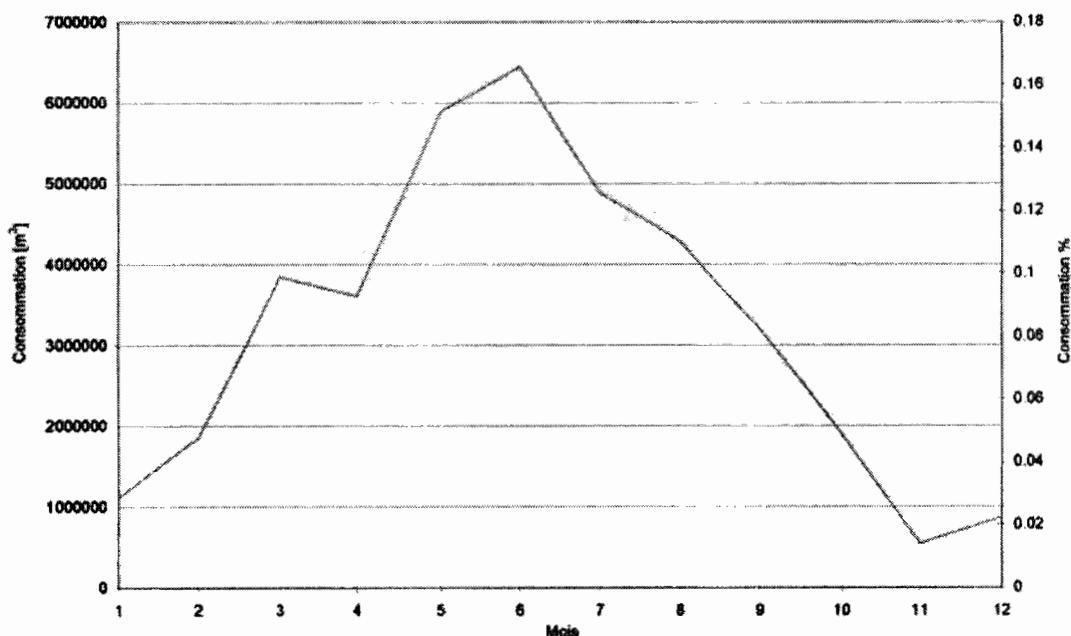


Figure 19 : Evolution des prélèvements au cours de l'année (ZonAgri).

La figure suivante montre que la consommation en eau est maximale en juin (environ 16,5 % de la consommation totale) et minimale en novembre (moins de 1,5 %). Donc en fonction des variations présentées ci-dessus, les piézomètres ayant des observations qui représentent des variations saisonnières dont les niveaux les plus bas se trouvent à la fin du printemps et au début de l'été, et dont les pics se trouvent à la fin de l'automne, ces piézomètres ont été considérés plutôt influencés par les prélèvements pour l'agriculture dans les comparaisons qui suivent.

III - 2 - 4 - Analyse graphique de la piézométrie

Le but de la comparaison graphique est de classer les piézomètres en différentes familles suivant plusieurs critères qui prennent en compte la similitude du comportement de la piézométrie, la vitesse de la baisse de la nappe, et les fréquences des fluctuations observées.

III - 2 - 4 - 1 - Regroupement des piézomètres en familles de comportement homogène

La comparaison des comportements des chroniques piézométriques observées nous a permis d'identifier trois familles des piézomètres.

Famille 1 (Figure 20) : Cette famille est composée des piézomètres les plus proches du barrage, jusqu'à 12 km à son aval (El Haouareb 5, M21, M22, M24, Houfia1, M7-M7bis, M23-M23bis-M23ter, P1 Elgrine-P1 Elgrinebis, M29, M30, M3bis, A-Abis, et Q).

Malgré la différence d'amplitude des fluctuations, le comportement de la nappe en ces points apparaît largement influencé par les fluctuations des apports représentées par les cotes de la retenue. De fortes fluctuations saisonnières ne s'observent pas sur la piézométrie de cette famille, à l'exception du piézomètre Q dont le niveau est très perturbé ce qui est probablement dû à la proximité d'un puits ou d'un forage (Aouadi, 2004) ; il est cependant raisonnable de l'intégrer dans cette famille puisque sa tendance générale suit celle des autres piézomètres voisins.

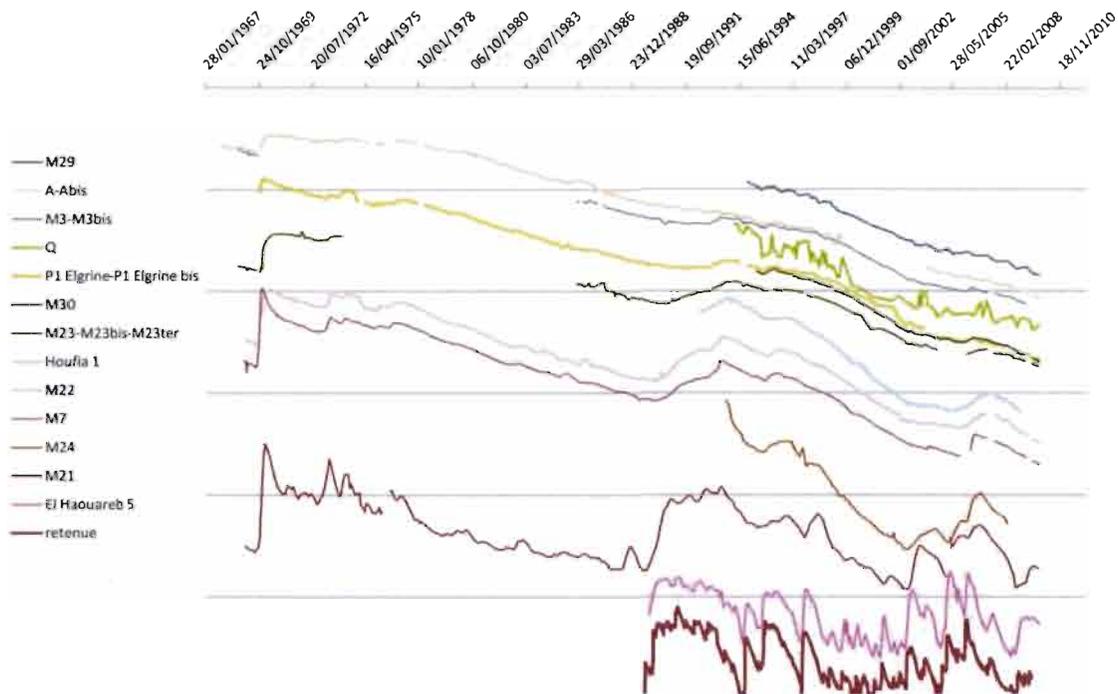


Figure 20 : Regroupement des piézomètres de comportement homogène, Famille 1.

* L'axe vertical n'exprime pas la profondeur réelle.

L'historique des niveaux se divise principalement en 4 périodes. La première est une période d'une baisse très légère voire d'une stagnation des niveaux (A-Abis, M30) suite aux inondations de 1969. La baisse pendant cette période varie entre 0,3 m/an (M21) et 0,15 m/an (A).

La deuxième période commence vers la fin des années 70 et continue jusqu'en 1989, l'année de la mise en eau du barrage. Cette période se caractérise par une baisse annuelle quasi-constante de l'ordre de 0,6 m/an. Par contre, la période qui suit se caractérise par une hausse rapide des niveaux qui varient de 7 m (M21) à 2 m (M23bis). Un décalage temporel s'observe entre les hausses de niveau enregistrées sur chaque piézomètre. Il varie en fonction de la distance du barrage et peut atteindre même un an (entre M24 et M23bis). Un tel décalage n'existait pas après les crues de 1969, ce qui suggère une différence du mode de recharge de la nappe entre les deux événements : une recharge directe par infiltration des crues en 1969 et une recharge indirecte par des écoulements souterrains à partir de 1989.

La quatrième période est une période de reprise d'une baisse des niveaux plus importante que la période de baisse précédente. Le niveau de la nappe diminue avec une vitesse qui peut aller jusqu'à 1,7 m/an (M24 pendant la période 1997-2003). Elle est perturbée par des remontées des niveaux en 2005, année à précipitation importante. Ces remontées sont cependant moins importantes que celles enregistrées après la mise en eau de la retenue.

En effet, la comparaison entre les périodes identifiées sur les chroniques piézométriques de cette famille avec les pluies enregistrées sur la station de Kairouan-SM (Figure 21) montre que l'évolution de la piézométrie dans cette partie de la plaine est bien corrélée à l'évolution de la pluviométrie. Ceci suggère que les faibles baisses/stagnations observées pendant la première période pourraient être dues à de forts apports pluviaux. Ceci suggère aussi que la baisse plus forte de la deuxième période ne soit pas due qu'à l'augmentation des prélèvements, mais qu'elle soit aussi le résultat d'une baisse progressive des apports. Dans ce contexte, il est probable que la piézométrie pendant la période inférieure à 1969 qui remonte jusqu'au début des années 50 soit marquée par une baisse légère (inférieure à la baisse de la deuxième période identifiée 1980-1989).

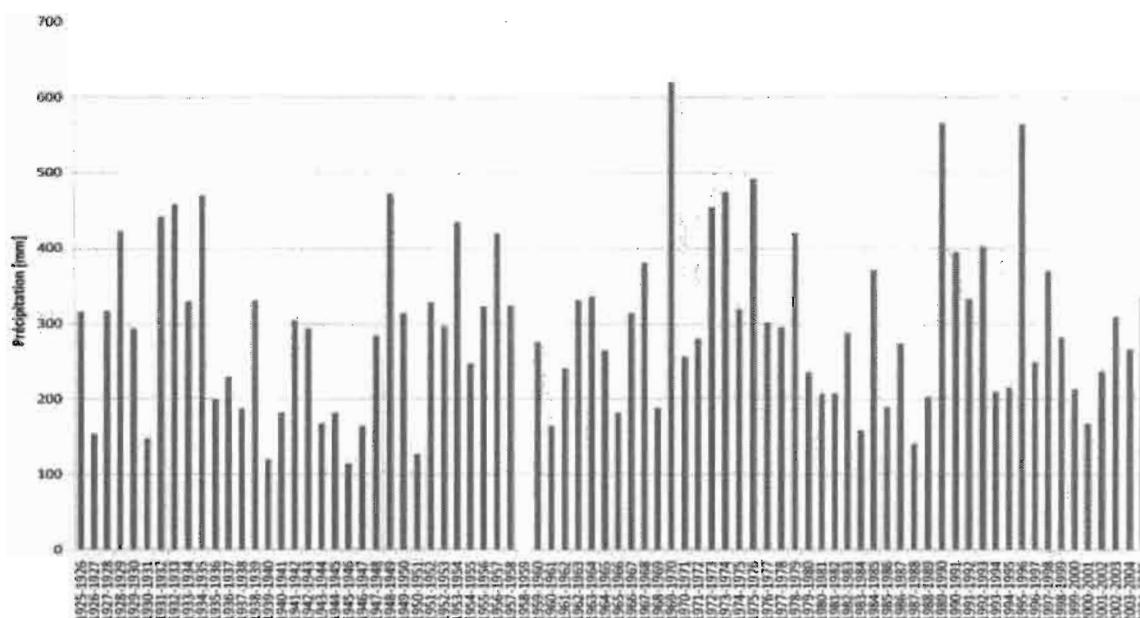


Figure 21 : Pluie annuelle enregistrée à la station de Kairouan SM.

En fin, il est important de signaler que la différence de la baisse accumulée des niveaux sur l'ensemble de la période 1989-2009 reflète plus ou moins le degré de la sensibilité des piézomètres face aux fluctuations des apports. En effet, la baisse totale observée est minimale sur les piézomètres les plus proches du barrage (0,9 m et 0,4 m sur El Haouareb 5 et M21 respectivement entre 10/1989 et 10/2009). Elle augmente de l'amont vers l'aval, en passant par 6,8 m sur M7 et atteint une valeur maximale de 9,2 m sur le piézomètre P1 Elgrine.

Famille 2 (Figure 22) : Les piézomètres qui composent cette famille sont Cbis, M2bis, Bbis, X8 qui sont encore en activité, et les piézomètres fermés M1, M5 M8 et M9. Ils se trouvent dans la partie médiane plutôt à l'Est de la zone d'étude à une distance moyenne d'environ 17 km du barrage. Malheureusement aucune chronique ne couvre l'ensemble de la période 1969-1989, ce qui nous donne une idée moins complète du comportement de la nappe sur ces points. C'est pour cela que nous avons ajouté en témoin le piézomètre Z16, vu que son comportement est très similaire avec celui des piézomètres de cette famille.

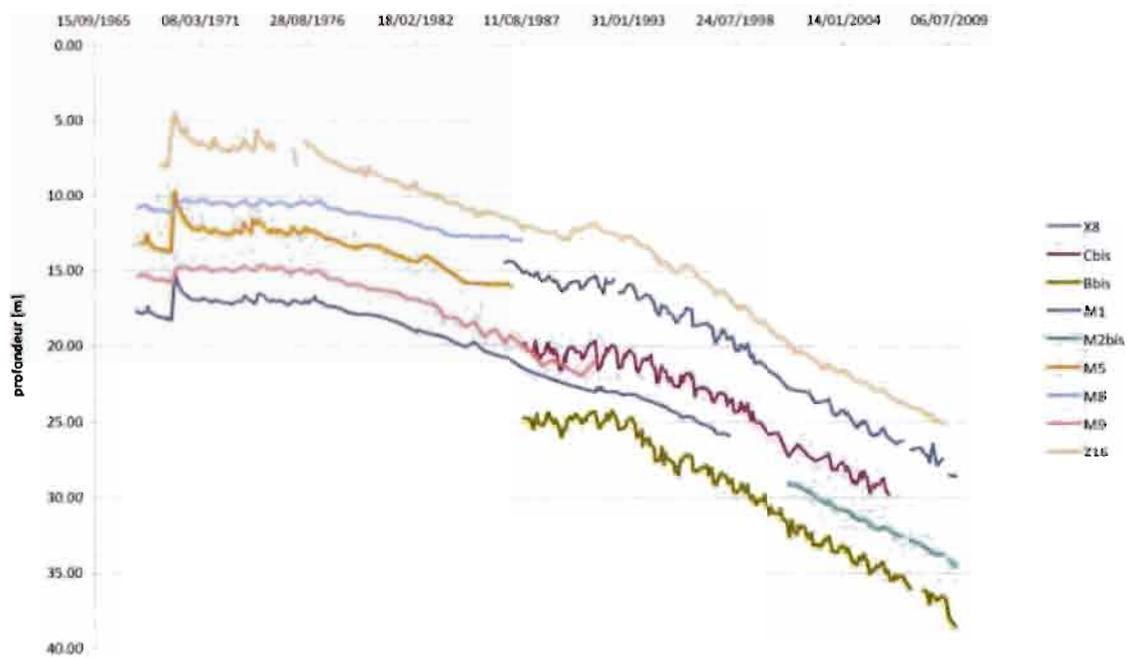


Figure 22 : Regroupement des piézomètres de comportement homogène, Famille 2.

Le caractère le plus évident de ces piézomètres est la forte perturbation des niveaux observés. Sauf pour M1 et M2bis dont le comportement diffère sensiblement des autres piézomètres. Cette différence est peut être due à une moindre influence de pompage, dans une zone urbaine par exemple, une hypothèse qui aurait dû être vérifiée par une visite de terrain, et dont les références traitant l'évaluation du système d'observation de la plaine de Kairouan n'ont pas parlé.

Néanmoins, l'observation des chroniques de l'ensemble des piézomètres ci-dessus montre que le comportement de la nappe dans cette zone se divise aussi en quatre périodes comme la première famille : une première période de stagnation des niveaux de la nappe jusqu'à la fin des années 70 ;

une deuxième période de baisse d'une vitesse moyenne de l'ordre de 0,5 m/an ; une troisième période d'une baisse toute légère observée difficilement sur les piézomètres M9, Cbis, Bbis, et X8 ; une quatrième période de baisse avec une vitesse plus importante que la précédente de l'ordre de 0,9 m/an, mais cette fois, cette baisse n'est pas du tout perturbée par une hausse en 2005 comme c'est le cas pour les piézomètres de la première famille, ce qui veut dire que les fluctuations des apports dans cette partie ont très peu d'effet sur les fluctuations des niveaux de la nappe.

Famille 3 (Figure 23) : Cette famille regroupe les piézomètres qui se trouvent à l'extrémité Est de la zone d'étude à coté de la ville de Kairouan. Ce sont les piézomètres M10-M10bis, M11-M11bis, M17-M17bis, Ebis (en activité) ; M13, M14, M16, M19 et M20 (fermés). Les chroniques de cette famille se distinguent par deux caractéristiques principales : de fortes fluctuations saisonnières observées surtout sur les piézomètres E et M17, et non perturbation des chroniques par les événements hydrologiques majeurs dans la plaine (les inondations de 1969, la mise en eau du barrage en 1989, les périodes humides 1995-1996, 2005-2006), observée sur le reste des piézomètres.

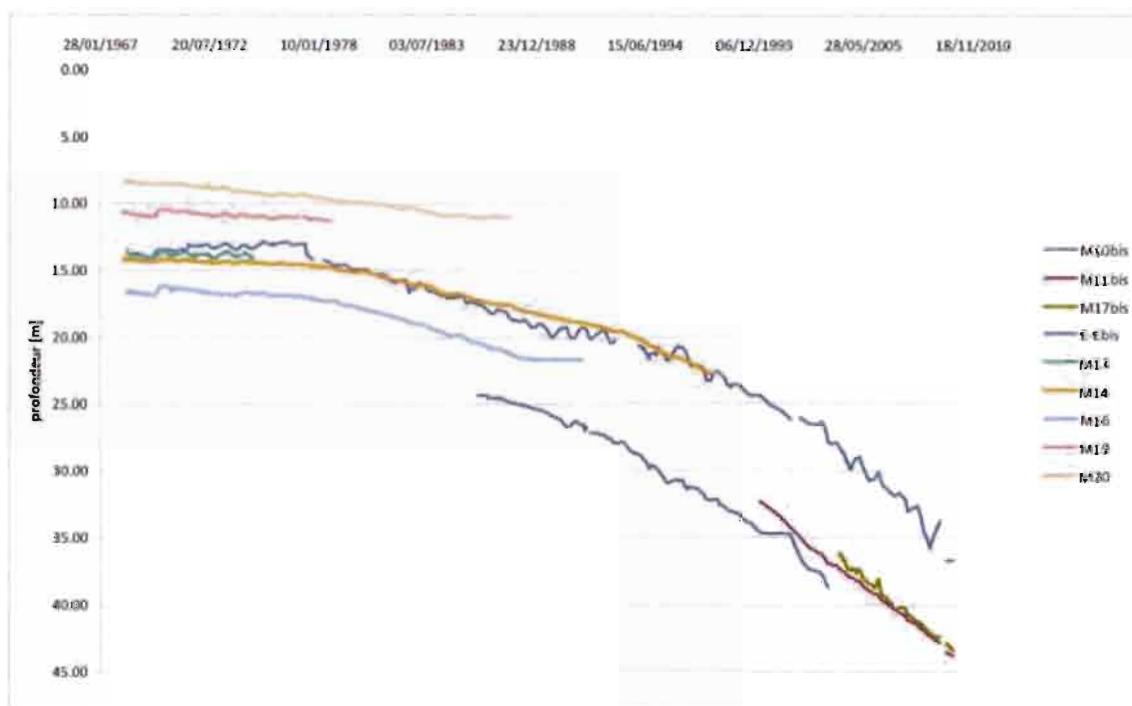


Figure 23 : Regroupement des piézomètres de comportement homogène, Famille 3.

L'historique des observations des niveaux de la nappe sur cette zone se divise seulement en deux périodes. La première est une période de stagnation mais sans remontée remarquable suite aux inondations de 1969. La deuxième période qui commence vers la fin des années 70 est une période de baisse constante non perturbée par des hausses comme celles observées dans les deux premières familles. La vitesse de la baisse de la nappe s'accroît à partir de la fin des années 80 et passe de moins de 0,25 m/an durant la période 1977-1989 à plus de 1,1 m/an durant la période 1993-2009 (M17-M17bis), pour atteindre la baisse la plus importante dans la zone d'étude dans cette partie.

Finalement, il nous reste le piézomètre M28 qui se trouve au Nord du Djebel Draâ Affane dans la partie Sud-ouest de la zone d'étude. Nous n'avons pas pu l'associer à aucune des trois familles précédentes, vu que son comportement était différent de tous les autres comportements observés (cf. Figure 7, Figure 24).

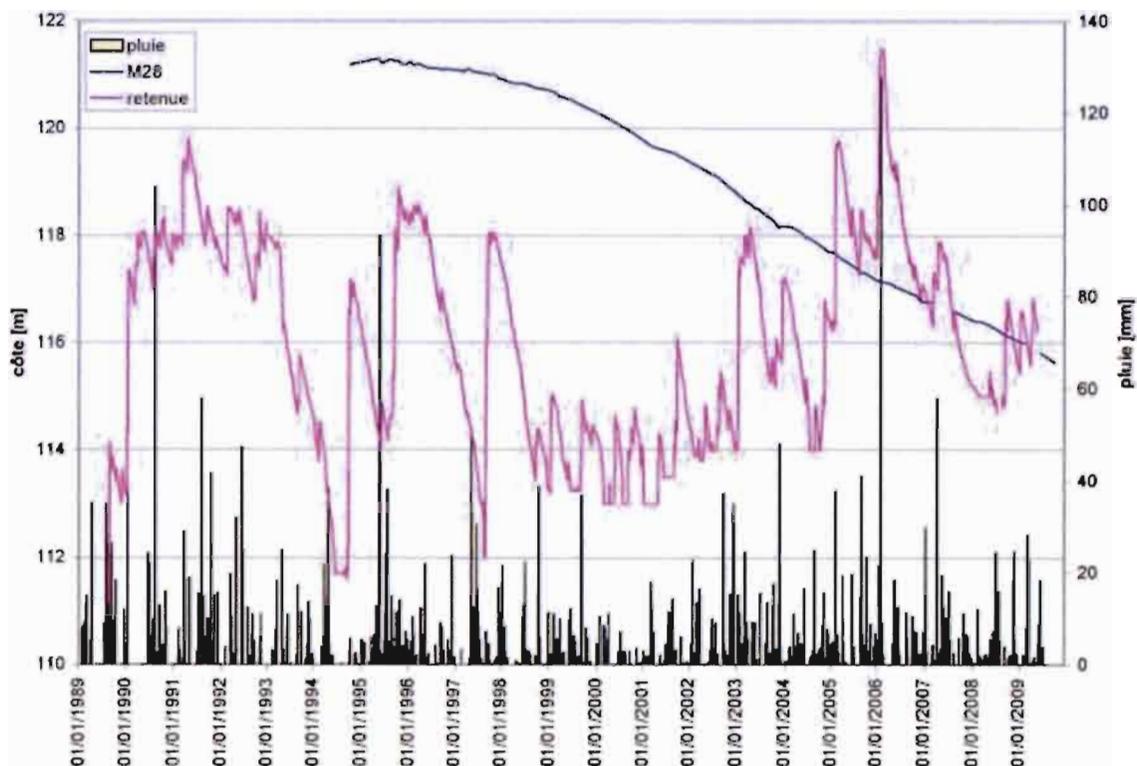


Figure 24 : Chronique piézométrique de M28, de la cote de la retenue, et des pluies mesurées au barrage.

La chronique de M28 ne montre aucune réaction de la nappe face aux fluctuations des apports. Elle est très lisse et n'est quasiment pas perturbée par les pluies. La baisse du niveau de la nappe en ce point est inférieure à toutes les baisses des niveaux observées sur les autres parties de la zone pendant la même période. La baisse enregistrée ne dépassait pas 0,5 m/an (durant la période 2001-2009).

En plus d'être non influencée par les fluctuations des apports, la chronique de M28 ne montre aucune fluctuation saisonnière. Ces deux caractères et sa localisation dans une zone où il n'y a que peu de culture et où il n'y a pas d'influence de l'Oued Zeroud (Aouadi, 2005) font de M28 un piézomètre particulièrement important, qui pourrait nous servir comme témoin de la tendance lourde de l'évolution des apports.

En fin, le regroupement en famille de comportement homogène qui est montré dans la figure (25) montre qu'à priori la distance du barrage joue apparemment le rôle le plus important sur le comportement de la nappe.

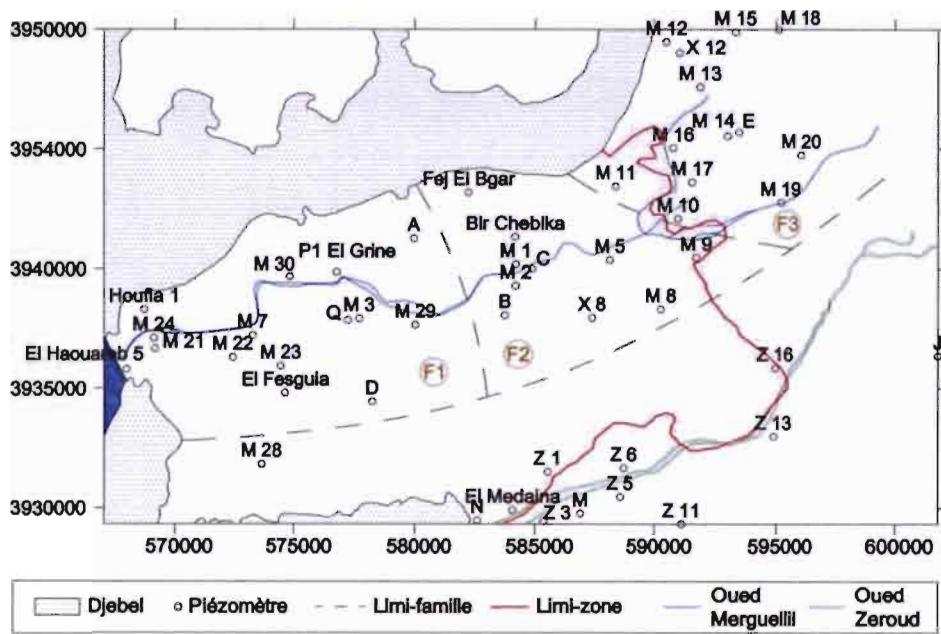


Figure 25 : Regroupement en famille de comportement homogène.

III - 2 - 4 - 2 - Regroupement en familles de pareilles baisses

Dans cette partie une comparaison de la piézométrie avant et après la construction du barrage a été faite. L'objectif était de suivre l'évolution de la surface de la nappe dans un premier temps, et dans un deuxième temps de relever les zones où les baisses étaient sensiblement supérieures à leurs environnements, ce qui peut signifier une zone où les prélèvements sont importants. Pour cela quatre périodes ont été choisies : 1978-1982, 1986-1989, 1993-1995, 1999-2002 (Figure 26).

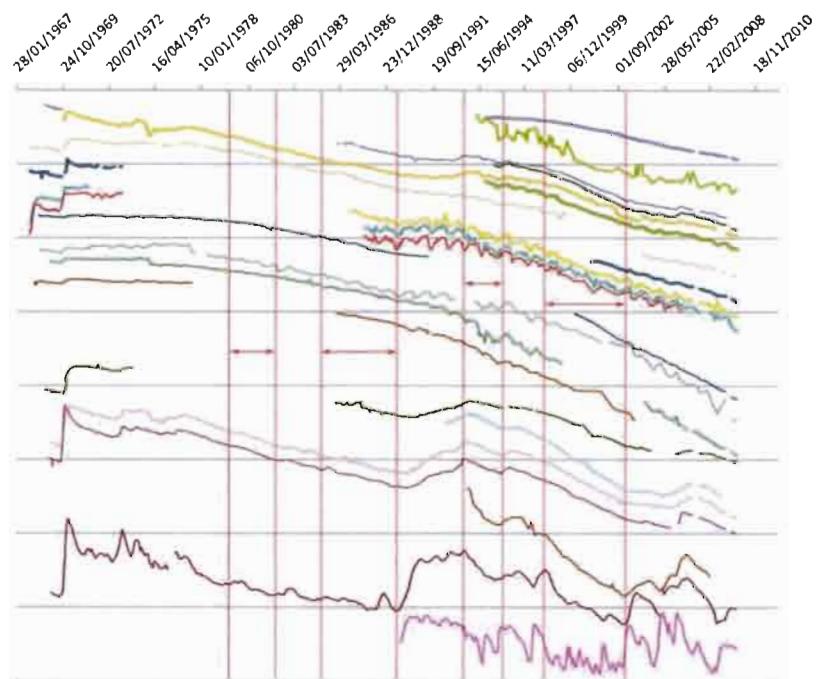


Figure 26 : Périodes de comparaison de la baisse de la piézométrie.

A l'exception des piézomètres M21, X8, Cbis, et Bbis, les niveaux étaient marqués par une baisse constante qui n'était pas perturbée par de grandes remontées de la nappe.

Quant aux apports à la nappe pendant ces périodes, pour les périodes antérieures à la mise en eaux du barrage nous ne disposons pas d'idée sur les quantités entrant à la nappe. En effet, les seules données disponibles étaient des mesures de flux d'eau de surface faites par un jaugeage sur une station installée à 4,5 km à l'aval du seuil d'El Haouareb, et qui contrôlait une superficie² de 890 km². Ces mesures de jaugeage étaient faites deux fois par mois (Annexe 25), ce qui est insuffisant pour donner une idée des volumes d'eau arrivant à la plaine, et par conséquent sur les volumes infiltrés.

Concernant les périodes postérieures à la fermeture du barrage, les volumes entrant à la nappe ont été calculés en deux étapes. La première consistait à calculer les volumes du stock d'eau dans le barrage pendant les périodes choisies. Par la suite, il a fallu calculer les volumes entrants à la nappe en prenant une partie du volume stocké (infiltration) et en ajoutant à cela 5 M m³/an comme contribution de la nappe d'Aïn El Beidha.

Les volumes stockés dans la retenue ont été calculés en suivant les abaques H/V/S proposés par Virrion (2006-b) (Annexe 24). Ensuite, pour calculer la lame d'eau infiltrée, nous avons pris un taux dans la gamme [52-63] % suivant les propositions de Kingumbi *et al.* (2004) et de Virrion (2006-b) respectivement. Finalement, les apports à la nappe estimés pendant les périodes 1993-1995 et 1999-2002 bousculaient entre 14 et 17 Mm³/an et entre 7,5 et 9 Mm³/an respectivement.

Enfin, quant à l'évolution de la piézométrie pendant les périodes choisies, nous avons calculé les baisses moyennes annuelles pour chaque période. Les résultats sont montrés dans les figures qui suivent (Figure 27-a-b, Figure 28-a-b).

² La superficie du sous-bassin aval de Merguellil est d'environ 1200 km²

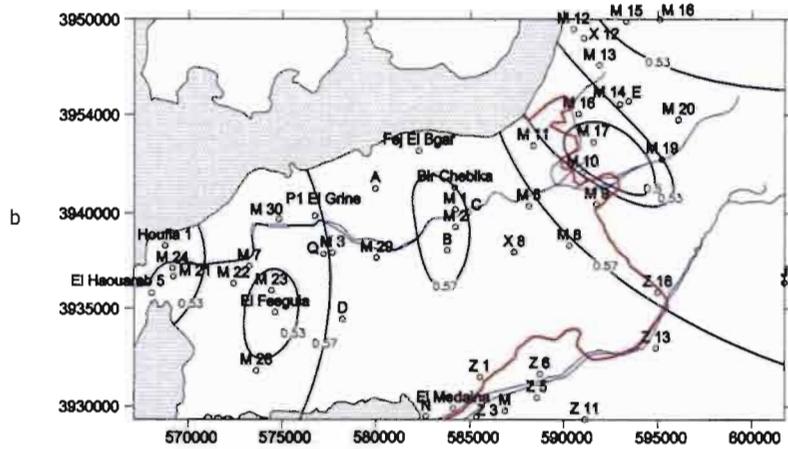
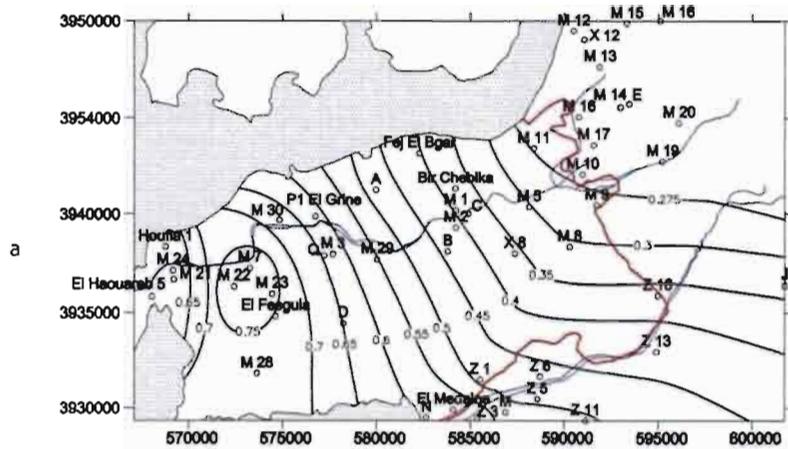


Figure 27-a-b : Baisse moyennes annuelles de la piézométrie pendant les périodes 1978-1982 (figure a), 1986-1989 (figure b).

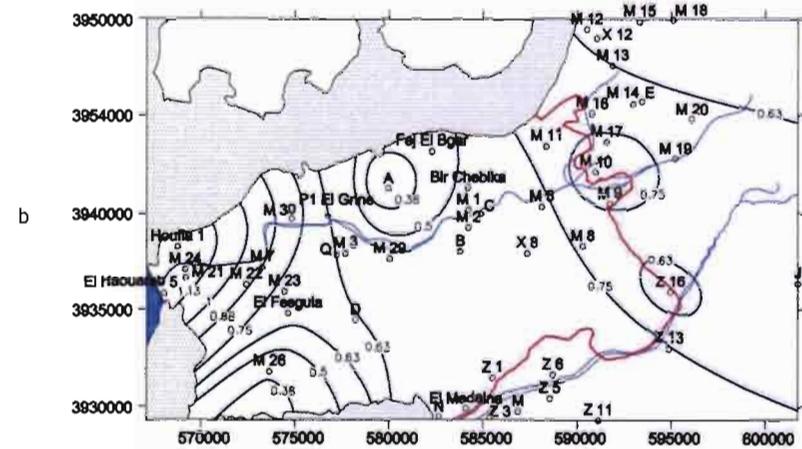
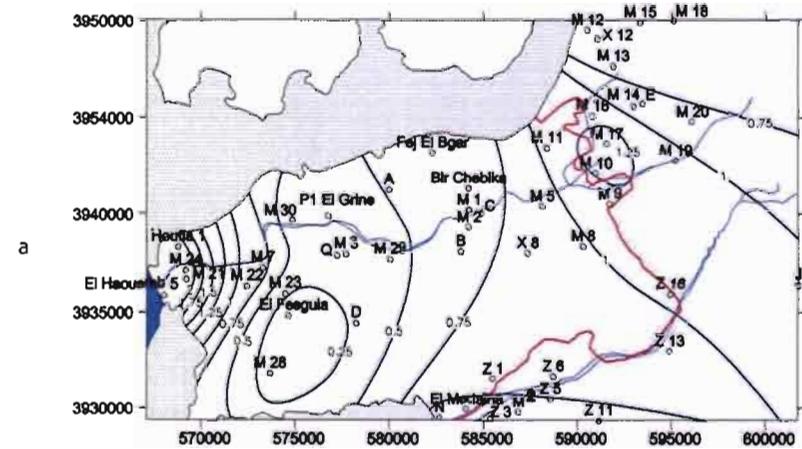


Figure 28-a-b : Baisse moyennes annuelles de la piézométrie pendant les périodes 1993-1995 (figure a), 1999-2002 (figure b).

L'observation des quatre figures précédentes montre que les baisses de la piézométrie à l'Ouest ont toujours été plus importantes que dans le reste de la plaine, que ce soit en régime naturel ou après la construction du barrage. Alors que dans la partie Est de la plaine, en régime naturel au début des années 80 les courbes d'iso-baisse ne montraient pas de fortes baisses.

Or, à l'échelle du sous-bassin aval du Merguellil, au début des années 80 (Figure 27-a) le rangement des isopièzes perpendiculairement aux cours d'eau et la diminution en baisse de l'amont vers l'aval, montre que c'étaient les apports de crue provenant du sous-bassin amont qui avaient l'influence la plus importante sur la nappe à cette époque.

Plus récemment pendant les trois dernières années précédant à la fermeture du barrage El Haouareb (Figure 27-b), les courbes d'iso-baisse montrent qu'une tendance de baisses locales plus concentrées à l'aval commence à s'observer, surtout dans la partie Nord-est de la plaine au niveau des piézomètres M9, M10, et M17. Cette tendance est observée également dans les périodes de qui suivent (Figure 28-a-b). Ces baisses locales signifient probablement une augmentation des prélèvements pour l'agriculture au Nord-est de la plaine. Et contrairement, les fortes baisses observées à l'amont sont reliées plutôt à la diminution des apports.

Nous avons comparé notre conclusion avec une carte de la répartition de la consommation en eau par l'agriculture, issue par *ZonAgri* (Figure 29).

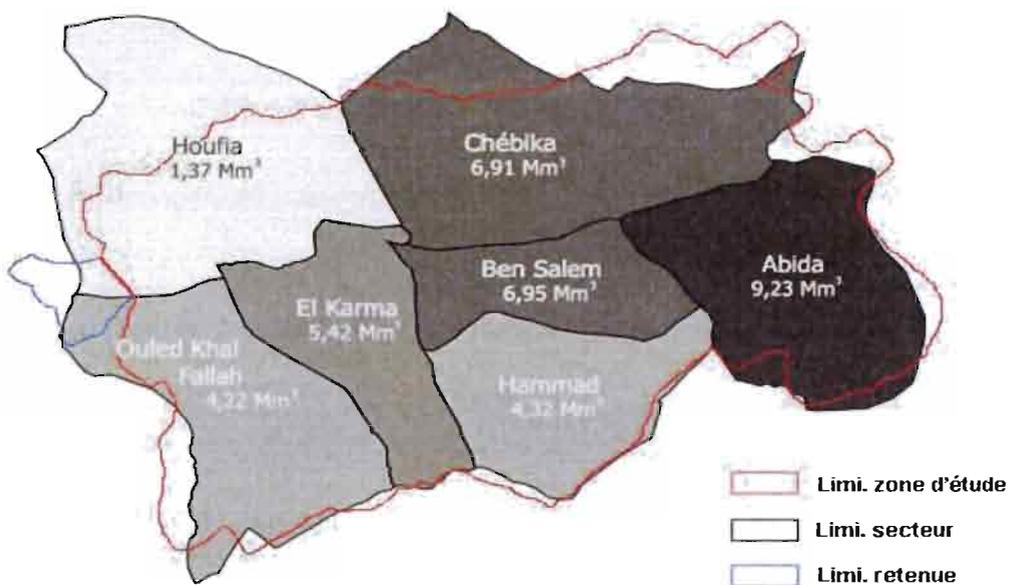


Figure 29 : Carte de la consommation d'eau issue de *ZonAgri*³.

La carte précédente montre que la consommation de l'eau est la plus importante dans le secteur d'Abida qui se trouve dans l'extrémité Sud-est qui coïncide en partie avec le lit de l'oued du Zeroud. Nous ne pouvons ni confirmer ni infirmer notre conclusion vu que nous ne disposions dans cette

³ Les chiffres correspondent à une année hydrologique moyenne.

partie de la plaine que d'une seul piézomètre (Z16). Donc, les calculs que nous avons fait de la baisse de la piézométrie ne sont pas forcément représentatifs de la baisse dans cette zone. De plus, concernant la base de données de ZonAgri, c'était une typologie qu'on les avait considérée représentatives de l'ensembles des secteurs de chaque échantillon. Néanmoins, cette carte montre que la consommation en eau augmente de l'amont à l'aval ce qui consirme notre hypothèse.

III - 2 - 4 - 3 - Regroupement en familles de pareilles fluctuations

Cette comparaison vise à regrouper les piézomètres selon le mode de variation observée. Comme nous l'avons vu dans la partie (III-4-2-1), les piézomètres ont été répartis en trois familles dont la première était la plus influencée par les fluctuations des écoulements souterrains. Dans cette partie, nous avons regardé de plus près les fluctuations de la piézométrie, et nous les avons comparées par la suite par le mode de l'évolution saisonnière des prélèvements proposée par ZonAgri. Les prélèvements sont supposés avoir leur maximum en juin et leurs minimum en novembre, alors que les apports sont supposés augmenter à partir du mois de septembre et diminuer à partir de la fin du mois de mars suivant l'évolution saisonnière de la pluviométrie (cf. Figure 10).

L'observation de la piézométrie dans la partie Ouest de la plaine - que nous avons montrée précédemment influencée par les apports d'écoulements souterrains - (cf. Figure 20, Figure 30) ne montre pas des fluctuations saisonnières, exception faite pour le piézomètre M21 pendant les périodes 1970-1972 et 1990-1993, où des variations saisonnières s'observent. Cela signifie que les prélèvements de l'agriculture ne sont pas le facteur le plus important influençant la piézométrie dans cette partie de la plaine.

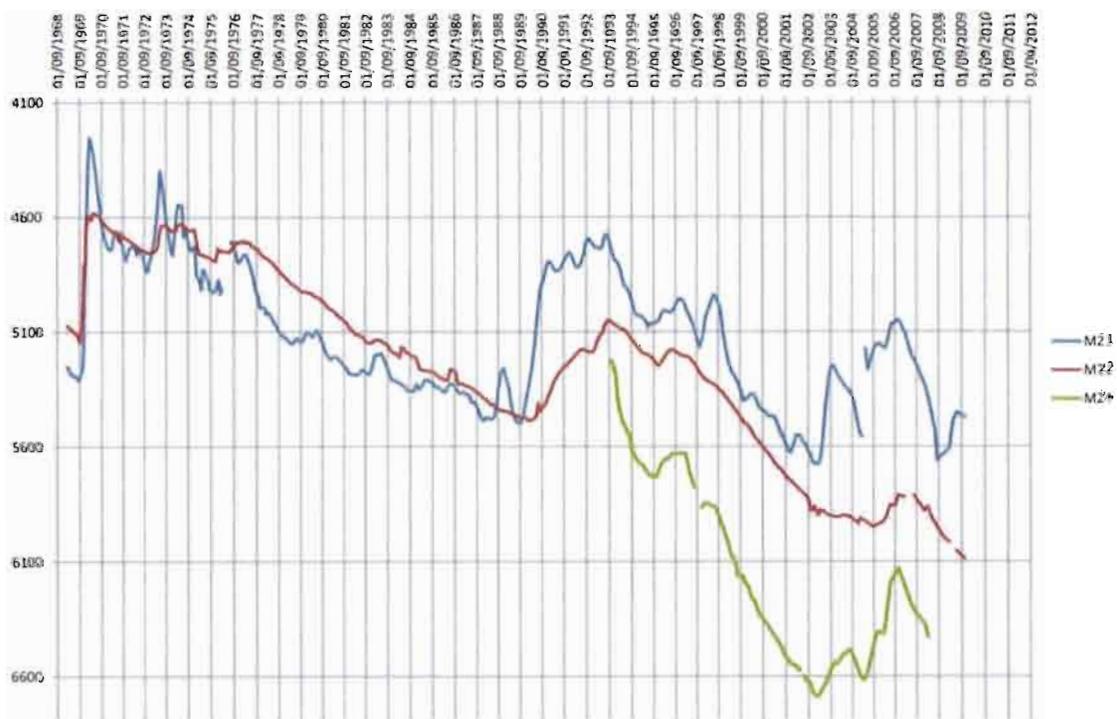


Figure 30 : Fluctuations saisonnières des piézomètres M21, M22, et M24.

Plus à l'aval dans la partie Est de la zone d'étude, le comportement de la nappe est différent (Figure 31).

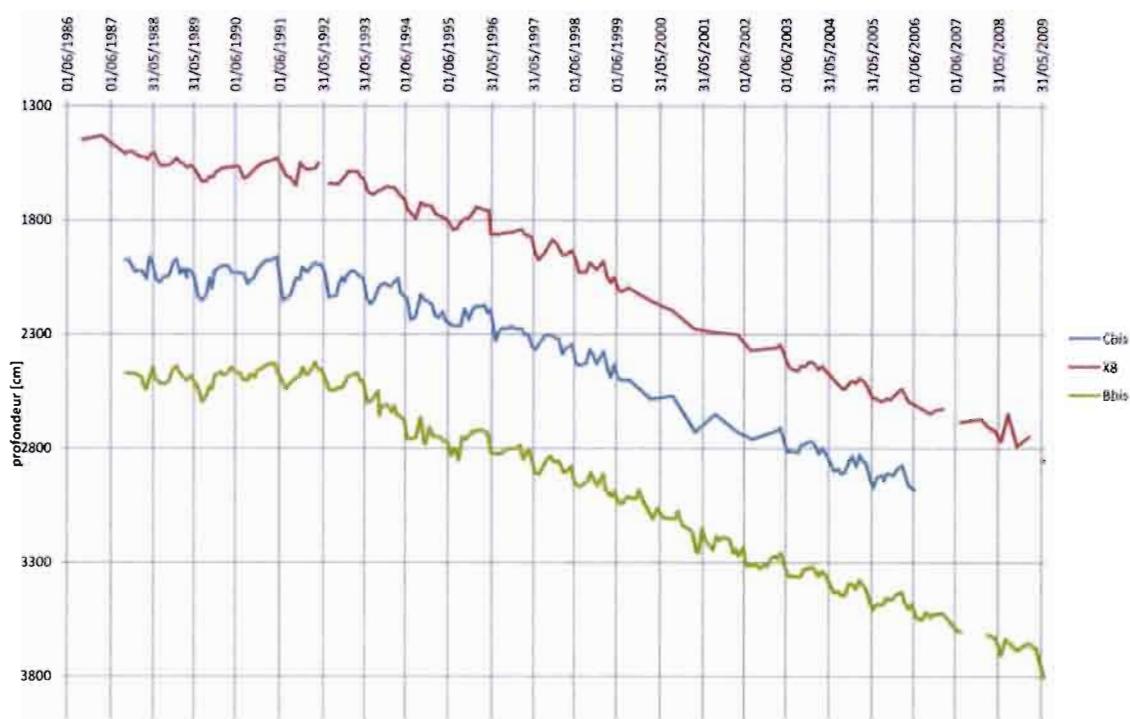


Figure 31 : Fluctuations saisonnières, piézomètres Bbis, Cbis, et X8.

La figure précédente montre que les fluctuations des apports ont une fréquence annuelle. En effet, les niveaux les plus bas observés se trouvent entre septembre et juin. Cela signifie que ces fluctuations correspondent à des prélèvements pour l'agriculture si nous suivons l'hypothèse qu'au cours de l'année les paysans commencent à diminuer leur pompage à partir du mois de septembre, c'est quand les pluies commencent à tomber sur la plaine.

Le même comportement s'observe plus à l'aval de la plaine (Figure 32), mais la comparaison de la figure (31) avec la figure (32) peut infirmer l'hypothèse que ces fluctuations correspondent à des prélèvements et non à des variations des apports. Le fait que de telles variations des niveaux s'observent durant les années 70, c'est-à-dire avant la prolifération des pompages dans la plaine, pose la question de la cause de ces fluctuations, et pourrait signifier que le pompage n'est pas pratiquement la cause de la baisse de la surface de la nappe. Cette problématique sera discutée plus en détail dans la partie suivante.

Quoi qu'il en soit, le regroupement des piézomètres en familles de pareilles fluctuations est le même que celui par comportement homogène. Les variations saisonnières de la piézométrie s'observent de plus en plus de l'amont vers l'aval.

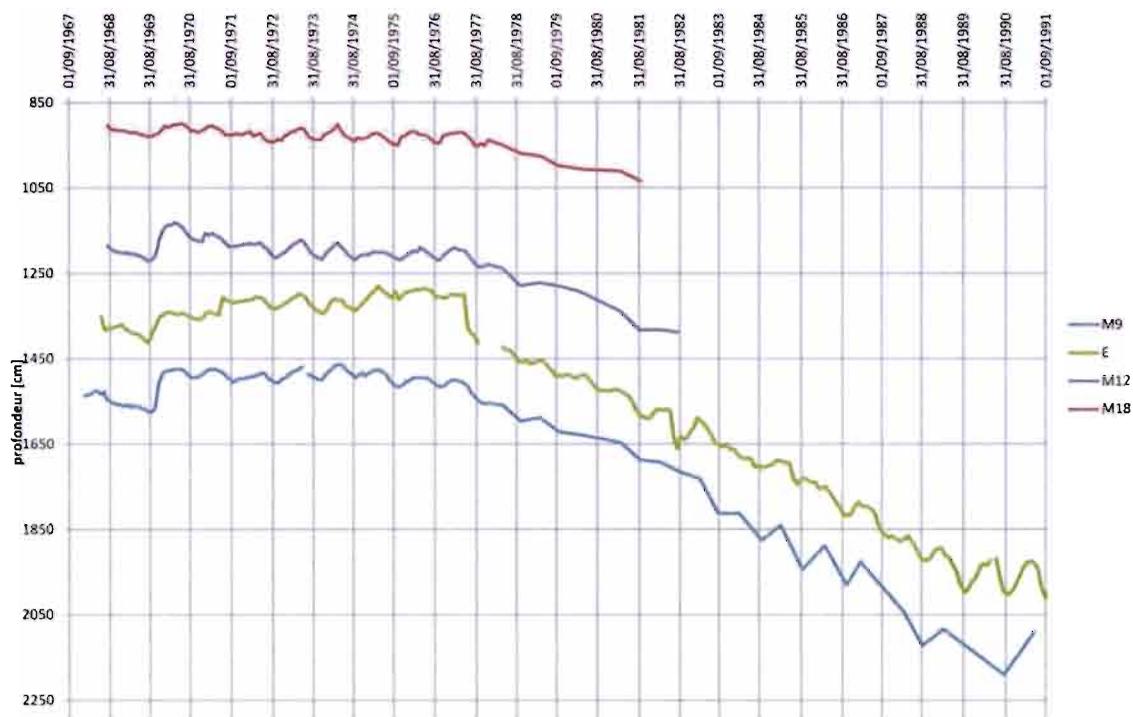


Figure 32: Fluctuations saisonnières des piézomètres E, M9, M12, et M18.

III – 2 – 4 – 4 – Résultat des regroupements et discussion

A la lumière des comparaisons qui ont été faites pour regrouper les piézomètres en familles, nous avons tendance à découper la zone d'étude en deux sous-zones principales. La première contient tous les piézomètres qui se trouvent entre le barrage et le piézomètre A-Abis (les piézomètres de la première famille), et la deuxième contient le reste des piézomètres qui se trouvent dans la partie médiane et Est de la zone d'étude.

La première sous-zone est sensible aux apports à la nappe par écoulement souterrain sous le barrage et visiblement les chroniques piézométriques les plus perturbées sont en bonne concordance avec les fluctuations observées dans la retenue, surtout pour les piézomètres les plus proches (entre le barrage et le piézomètre M23-M23bis). Pour ceux qui sont plus à l'Est de cette sous-zone, les chroniques semblent moins reliées aux fluctuations observées dans la retenue, mais restent bien corrélées à quelques évènements hydrologiques majeurs dans la plaine (crue de 1969, mise en eau du barrage El Haouareb). Donc en somme, cette sous-zone est moins représentative des prélèvements pour l'agriculture, plus représentative des apports à la nappe par écoulement souterrains. Néanmoins, une fluctuation saisonnière commence à s'observer dans les piézomètres les plus éloignés du barrage, comme A-Abis, M3bis, M29 et Q (Figure 33).

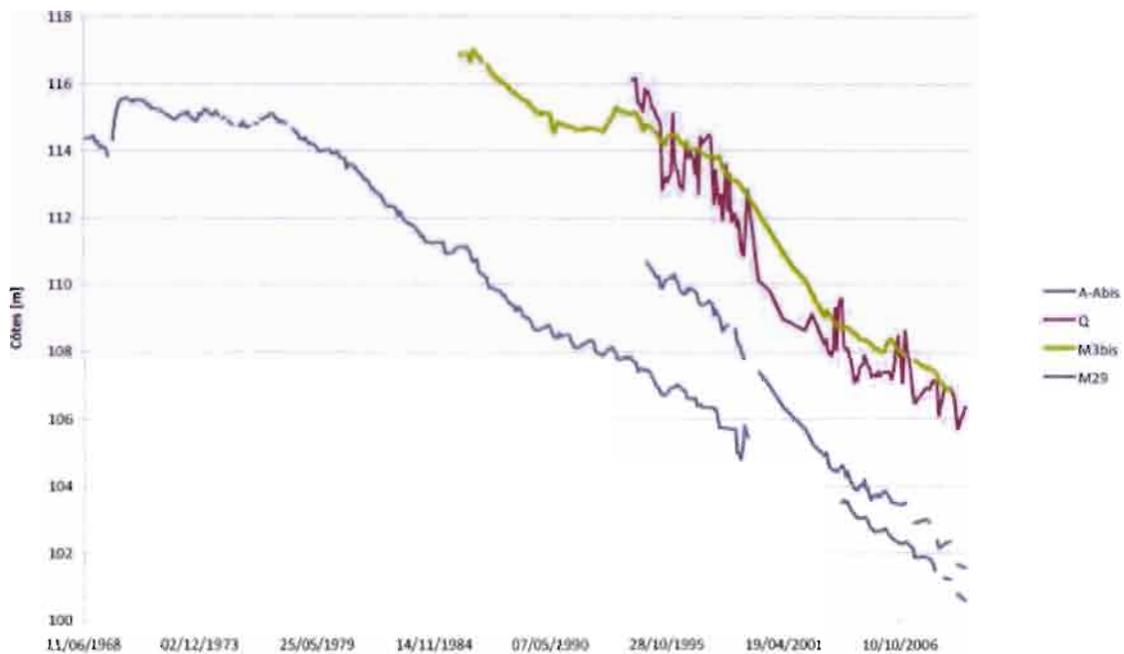


Figure 33 : Fluctuation saisonnières observées sur les piézomètres A-Abis, M3bis, M29, et Q.

Dans la deuxième sous-zone. Bien que nous ayons présumé que récemment la présence d'une agriculture plus dense dans la partie Est de la plaine était probablement derrière le fait que la vitesse des baisses augmentait de l'Ouest vers l'Est le long de l'oued, et que les fluctuations saisonnières s'observait plus fortement à l'Est qu'à l'Ouest, cette conclusion est confrontée par plusieurs facteurs qui nous empêchent de considérer que les prélèvements de l'agriculture soit le phénomène dominant sur les comportements observés dans cette partie de la plaine.

Le premier facteur est la propagation des écoulements souterrains dans la plaine le long de l'Oued. Cette propagation rend beaucoup moins sensible la nappe face aux variations des apports. Cette diminution de sensibilité facilite d'un côté l'identification d'un site dont les niveaux varient avec un ton saisonnier comme un site sollicité par l'agriculture, mais rend plus difficile d'un autre part la quantification des prélèvements de la nappe en l'absence d'un modèle de propagation des écoulements souterrains pour lequel nous n'avons malheureusement pas eu le temps de faire. Prenons les piézomètres qui se trouvent dans la partie Est de la plaine par exemple (M5, M8, M9, M10, M11, M12, M13, M14, M15, M16, M17, M18, M19, M20, et E), (Figure 34).

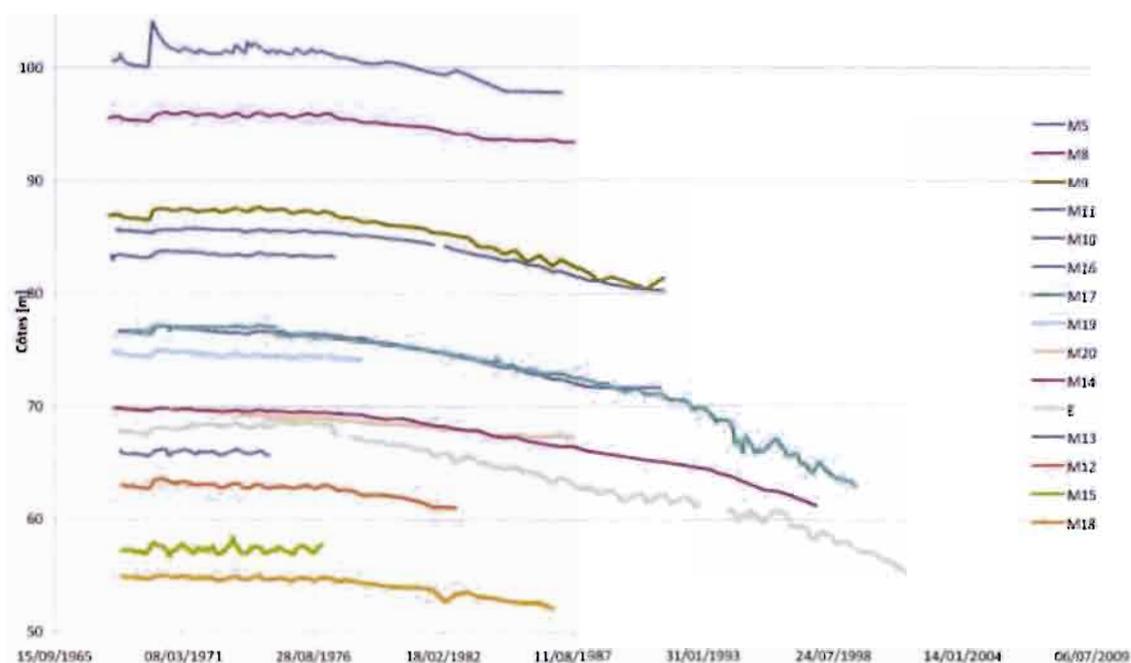


Figure 34 : Niveaux observés dans la partie Est et Nord-est de la plaine entre 1969 et 2001.

Suite aux inondations de 1969, les niveaux de la surface de la nappe ont enregistré des hausses dont l'amplitude a varié entre environ 4 m au piézomètre M5 et moins de 0,2 m au piézomètre M14. Il n'y a même pas eu de hausse au niveau des piézomètres M13 et M18. Si nous considérons que les volumes prélevés par l'agriculture dans cette partie de la plaine ne pouvaient pas à l'époque engendrer des perturbations des cotes observées, vu que les surfaces irriguées étaient limitées. Nous pouvons en ce cas considérer que l'évolution des niveaux de la surface de la nappe représentaient à l'époque les fluctuations des apports, et que le rabattement de l'Ouest vers l'Est des hausses observées étaient principalement dû, et de loin, à la propagation des apports. Pour confirmer cette hypothèse il suffit de regarder le comportement de la surface de la nappe durant la période qui suit les inondations de 1969 et qui se termine vers la fin des années 70. Les cotes observées évoluaient d'une manière saisonnière suivant un rythme dont les niveaux commençaient à augmenter au mois de septembre, le début de la saison de pluie. Ce qui veut dire que les apports à la nappe étaient le facteur dominant sur le comportement de la nappe à ce niveau de la plaine à cette époque.

Suite à la mise en eau du barrage El Haouareb en août 1989 et aux deux suivantes à forte précipitation, aucune remontée de la piézométrie n'a été enregistrées dans cette partie de la plaine, même au niveau du piézomètre M5 où la remontée en 1969 était la plus forte de cette sous-zone. Cela nous amène à deux hypothèses. La première est que les volumes qui sont arrivés à ce niveau de la plaine n'étaient pas assez importants de sorte qu'ils n'ont pas pu engendrer une hausse des niveaux de la nappe, ce qui était dû à la propagation des apports. La deuxième hypothèse est que l'augmentation du nombre des pompes dans la plaine qui avait commencé vers la fin des années 70 a engendré une hausse importante des volumes prélevés par le pompage, qui sont devenu supérieurs aux quantités alimentant la nappe arrivant sur cette sous-zone, ce qui est responsable, par conséquence, de la non-sensibilité de la nappe vis-à-vis aux apports à ce niveau de la nappe à cette époque.

De telles comparaisons n'étaient pas faites suite aux précipitations de 2005-2006 à cause d'une manque d'assez de données. Mais il ne serait pas probablement faut de considérer que le comportement de la nappe à cette époque a été similaire à son comportement entre 1989 et 1991.

Quoi qu'il en soit, que nous suivions la première ou la deuxième hypothèse, les prélèvements pour l'agriculture sur l'ensemble de cette sous-zone ne doivent pas dépasser les apports arrivant, sans quoi, la nappe aurait enregistré une légère stagnation après la mise en eau du barrage, ce qui n'est pas le cas. Cela veut dire que les prélèvements à cette époque représentaient un maximum de 18 Mm³/an, ce qui était la moyenne des volumes entrant à la nappe au niveau du seuil karstique d'El Haouareb entre 1989 et 1991.

Le deuxième facteur qui pourrait se confronter à notre conclusion que les fortes baisses à l'Est de plaine sont dues aux prélèvements pour l'agriculture, c'est que les deux oueds du Merguellil et du Zeroud se rejoignent à l'Est de la plaine. En cherchant dans la littérature, nous n'avons pas trouvé des références qui traitent l'estimation des volumes échangés entre les zones de la nappe de Kairouan au niveau de chaque oued. Il se peut donc que les fortes baisses enregistrées à l'Est de la zone d'étude soient dues à une différence des hauteurs piézométriques entre le sous bassin aval de l'oued Merguellil et le sous bassin aval de l'oued Zeroud.

A cet effet, Aouadi (2005) a révélé que les écoulements souterrains dans la partie Nord Du Djebel Draâ Affane suivaient une direction Ouest Est à partir du site du barrage El Haouareb jusqu'à la zone médiane de la plaine. Ensuite, la direction devient Sud-ouest Nord-est parallèlement à l'oued. Pour la partie Sud du Draâ Affane, les écoulements suivaient une direction Nord-ouest Sud-est à partir des gorges de Pavillier jusqu'à la partie médiane, et une direction Sud-ouest Nord-est par la suite, parallèlement à la foi aux deux oueds. Ceci, suggère que les quantités échangées entre les deux oueds soient négligeables (Annexe 26)

III – 2 – 3 – Analyse statistique de la piézométrie

III – 2 – 3 – 1 – Méthode de la corrélation croisée

III – 2 – 3 – 1 – 1 – Principe

Le test de la corrélation est une manière quantitative utilisée pour déterminer la similitude entre deux séries de données. Cette méthode est valable aussi pour les séries chronologiques à condition que les données utilisées correspondent à la même date.

Le test de la corrélation croisée a la forme suivante :

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{1}{n-1} \times \frac{\sum_{n=1}^n (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y}$$

Avec :

X, Y : Les deux séries testées.

x_t, y_t : Les valeurs observées à chaque pas de temps.

σ_x, σ_y : Les écarts types des deux séries.

n : Le nombre total des données.

La corrélation croisée est le test de la corrélation appliqué à chaque pas de temps ce qui permet de trouver la valeur maximale de la corrélation et le décalage en temps entre deux séries chronologiques.

III – 2 – 3 – 1 – 2 – Application et résultats

Nous avons vu intéressant d'appliquer cette méthode comme une approche pour essayer d'estimer d'une manière quantitative à quel point les signaux observés sur les différents piézomètres dans la zone d'étude correspondaient aux variations des apports. A cet égard, il a fallu trouver un piézomètre représentatif des apports à la nappe. Le choix du piézomètre El Haouareb 5 s'est révélé le plus pertinent parmi les autres piézomètres. Nous avons considéré que sa localisation juste à côté du barrage dans le karst lui permettait d'être en bonne connexion avec les eaux de la retenue. La forte similitude entre son comportement et celui des côtes de la retenue en témoigne (cf. Figure 18).

Le test de la corrélation croisée entre le piézomètre El Haouareb5 et la retenue nous a donné 90,78% de similitude entre les deux chroniques avec un décalage de 0 « pas de temps », ce qui veut dire que la nappe sur le site du piézomètre El Haouareb5 répond à un signal observé dans la retenue en moins d'un mois (les données sont des mesures mensuelles). Ce résultat nous a permis de considérer ce piézomètre représentatif des apports à la nappe, et de comparer par la suite le reste des chroniques piézométriques avec celle de ce piézomètre. Les résultats des comparaisons sont résumés dans le tableau suivant (Tableau 6).

Tableau 6 : Corrélations entre le piézomètre EL Haouareb 5 et le reste des piézomètres.

piéz.1	piéz.2	Décalage (mois)	Nb. d'observations	Corrélation %
El Haouareb5	X12	2	49	74,4
	M21	0	190	73,6
	Bbis	0	188	68,5
	Z16	0	179	68,5
	Z11	0	59	68,4
	M22	0	182	66,0
	P1 Elgrine	0	177	64,9
	N	0	183	64,2
	M10bis	1	98	63,1
	Bir Chebika	2	39	61,6
	Z5bis	1	71	61,6
	Z13bis	0	91	60,6
	M1	1	42	54,6
	M23-M23bis	0	127	50,1
	M17bis	1	121	43,2
	A-Abis	1	138	42,7
	M7-M7bis	2	119	36,3
	Z3	0	78	36,2
	M18	11	30	35,9
	Z 1-Z 1bis	0	155	35,6
	Cbis	0	140	33,7
	Z6-Z6bis	0	66	32,9
	Ebis	0	137	32,2
	M3bis	0	149	30,5
	X8	1	145	26,0
	M2bis	3	52	25,4
	M11bis	4	53	24,5
	El Medaina	2	50	22,5
	Houfia1	0	114	12,0
	M28	4	98	12,0
M30	3	95	12,0	
Q	0	110	11,6	
M24*	-	132	-	
Mbis*	-	71	-	

* Pour les piézomètres M24 et Mbis aucune corrélation d'une valeur positive n'a été trouvée.

* Les calculs ont été faits à l'aide du logiciel R.

III – 2 – 3 – 1 – 3 – Discussion des résultats et conclusion

En effet, la plupart des valeurs qui ont été obtenues par l'application de cette méthode ne représentaient pas la situation réelle, ni par rapport au décalage entre les observations ni par rapport au degré de dépendance.

Prenons par exemple les piézomètres X12 et X8. La corrélation obtenue entre El Haoareb5 et X12 était de plus de 70%, sans décalage, alors que pour X8 c'était de l'ordre de 26% avec un décalage d'un mois, malgré que la distance qui sépare les deux piézomètres du barrage qui est d'environ 30 et 20 km respectivement. Cette anomalie est sans doute liée aux nombres des données qu'ont été sélectionnées pour chaque calcul. Néanmoins, l'observation des résultats des piézomètres dont le nombre des observations sélectionnées étaient supérieur par exemple à 100 ne donnait non plus une idée plus claire sur la similitude entre les comportements des différents piézomètres et celui d'El Haouareb5. Comme les piézomètres M22 et M7 par exemple dont les corrélations et les décalages obtenus étaient de (66%,0 mois) et de (36,3%,2 mois) respectivement, alors que la distance entre eux est d'environ 1,2 km et que le comportement des observations faites à ces deux piézomètres sont quasiment identiques (cf. Figure 7).

Un autre facteur qui pourrait aussi jouer un rôle fallacieux dans ces calculs, c'est la différence de la nature des signaux captés, bien que par fois les résultats semblaient satisfaisants. Prenons par exemple les piézomètres M21, Bbis, et N. Ces trois piézomètres se répartissent dans l'Ouest, dans la zone médiane, et dans le Sud de la plaine respectivement. Ils ont les trois des nombres d'observations assez proches (190, 188, et 183 respectivement). Leurs corrélations avec le piézomètre d'El Haouareb étaient de 73,6%, 68,5%, et 64,2% respectivement, ce qui révèle une dépendance relativement forte des apports. Par contre, pour ces trois piézomètres, les phénomènes dominants étaient différents l'un de l'autre. Pour M21, comme indiqué plus haut, le phénomène dominant sur son comportement était la recharge à la nappe par infiltration des eaux de la retenue, alors que pour Bbis, les fluctuations suivaient un ton saisonnier qui était en bonne concordance avec le modèle des variations des apports de ZonAgri, ce qui indiquaient que ce sont les prélèvements pour l'agriculture qui influençaient le plus les niveaux observés dans la partie médiane et Est de la plaine. En fin, pour le piézomètre N, il se situe sur l'oued de Zeroud, ce qui veut dire, que son comportement est largement dépendant des lâchers du barrage Sidi Saad et non des volumes infiltrés sous le barrage.

Finalement, nous concluons à la lumière des exemples que nous avons choisis et présenté plus haut, que la méthode de la corrélation croisée n'est pas une approche pertinente à appliquer sur des séries chronologiques piézométriques pour avoir une meilleure compréhension de l'interconnexion entre eux et les degrés d'indépendance qui leur gouvernent, ni pour estimer le décalage entre les différents signaux observés. Certes, cette méthode demande que les calculs se basent sur un nombre bien unique pour toutes les populations testés, et dans le cas des séries chronologiques, elle demande que les données sélectionnées correspondent aux mêmes dates et qu'elles aient une fréquence identique (observations mensuelles, bimensuelles, semestrielles ...). Dans notre cas, ces deux règles n'ont été pas respectées à cause des différences des périodes observées selon chaque piézomètre, et à cause des différences des fréquences des observations par fois pour le même piézomètre. Finalement, dans le cas des chroniques piézométriques, un troisième facteur joue le rôle le plus important, c'est l'hétérogénéité des propriétés du sol d'un site à l'autre, ce qui rend en plus

les observations assujetties à des anomalies qui ne peuvent pas être expliquées par une application d'une approche statistique.

III – 2 – 3 – 2 – Méthode du « Bruit blanc »

Cette méthode se distingue de la méthode précédente par le fait qu'elle prend en compte plusieurs paramètres lors de l'analyse de la dépendance entre des séries chronologiques.

III – 2 – 3 – 1 – 1 – Principe

Le principe de la méthode du Bruit blanc consiste en analyser les signaux observés sur une série chronologique $\{Y_t\}$ comme étant la combinaison des signaux issus de deux sources $\{X_{1t}\}$, $\{X_{2t}\}$, qu'on suppose susceptibles à influencer la série testée. L'utilisation de cette méthode permet de retirer les signaux originaux d'une des deux sources d'influence disons $\{X_{2t}\}$ dès que les signaux de l'autre sont connus $\{X_{1t}\}$.

Pour ce faire, dans un premier temps, une régression de la série testée doit être faite par rapport à une des séries d'origine qui est connue, disons $\{X_{1t}\}$. Nous avons choisi de faire une régression linéaire entre les séries.

$$\hat{y}_i = a x_{1i} + b$$

Ensuite, les résidus entre les valeurs prédites \hat{y}_i et les valeurs originales y_i de la série testée sont calculés pour chaque pas de temps i .

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$$

S'il y a aucune dépendance entre les résidus et la série $\{X_{1t}\}$, en ce cas-là ils sont considérés comme des observations faisant référence à une deuxième variable x_{2t} qui doit être aléatoire par rapport à la première x_{1t} . Autrement dit, ça veut dire que nous avons deux phénomènes qui influencent la série testée, et qui ne sont pas reliés. Par contre, si les résidus montrent toujours de tendance de dépendance de la série $\{X_{1t}\}$ cela indique, soit que la régression choisie n'était pas pertinente, soit qu'il y a d'autres facteurs qui influencent la série $\{Y_t\}$.

L'identification des résidus comme indépendants ou non dépend de leurs caractéristiques, s'ils sont du *Bruit blanc*, en ce cas-là, ils sont indépendants de la série $\{X_{1t}\}$.

Nous citons ainsi la définition du Bruit blanc mise en place par Brockwell et Davis (2002) :

If $\{X_t\}$ is a sequence of uncorrelated random variables, each with zero mean and variance σ^2 , then clearly $\{X_t\}$ is a stationary with the same covariance function as the iid noise. Such sequence is referred to as White noise. This is indicated by the notation

$$\{X_t\} \sim WN(0, \sigma^2)$$

Where iid noise : independent and identically distributed noise.

III – 2 – 3 – 1 – 2 – Application et résultats

En ce qui nous concerne, nous considérons que chaque niveau observé de la nappe est le résultat de l'influence de deux facteurs principaux, ce sont les écoulements souterrains alimentant la nappe de l'Ouest, et les prélèvements pour l'agriculture.

Comme dans la méthode de la corrélation croisée, nous avons considéré dans un premier temps le piézomètre d'El Haouareb 5 comme représentatif des fluctuations des apports à la nappe. Par conséquent, les régressions linéaires ont été effectuées entre ce piézomètre et le reste des piézomètres de la zone d'étude.

Vu que la pertinence des résultats qu'on obtient de l'application des méthodes d'analyse statistiques dépende toujours de la quantité disponible des données et que leur qualité s'améliore le plus les données traitées sont nombreuses ; nous avons vu nécessaire dans un premier temps de prendre toutes les mesures des niveaux de la nappe dont nous disposons, malgré l'hétérogénéité des pas de temps de la prise de ces mesures qui peut sérieusement perturber les résultats obtenus. Les calculs ont été faits avec l'aide du logiciel R.

Dans la figure (36) nous présentons les résidus issus des régressions linéaires Bbis-El Haoaureb 5, M21-El Haoaureb 5.

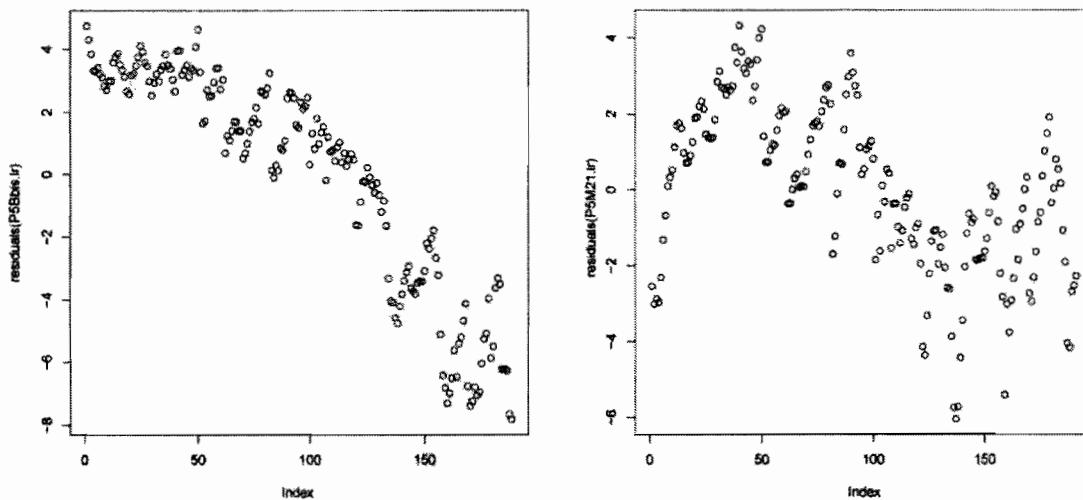


Figure 35 : Résidus des régressions linéaires El Haouareb5-Bbis, El Haoaureb5-M21.

En effet, les résidus issus de ces régressions n'avaient aucun sens. Par exemple, les variances des résidus de M21 étaient supérieures en amplitude par rapport à Bbis malgré que les comportements chroniques des deux piézomètres favorisent que les résidus de Bbis soient plus importants en termes d'amplitude.

Certes, les propriétés des résidus ne rassemblaient pas du tout à celles du bruit blanc, surtout par rapport à leurs variances qui n'étaient pas constantes. Ils avaient tous aussi des tendances de baisse et ne bouscuaient pas autour d'un axe horizontal. En plus, même la comparaison des résidus des piézomètres qui ne sont pas très loin l'un de l'autre et qui se trouvent dans des même sous-zones d'influences identifiées plus haut, ne donnait pas non plus une signifiante, comme le cas des piézomètres M21 et M24 (Figure 36).

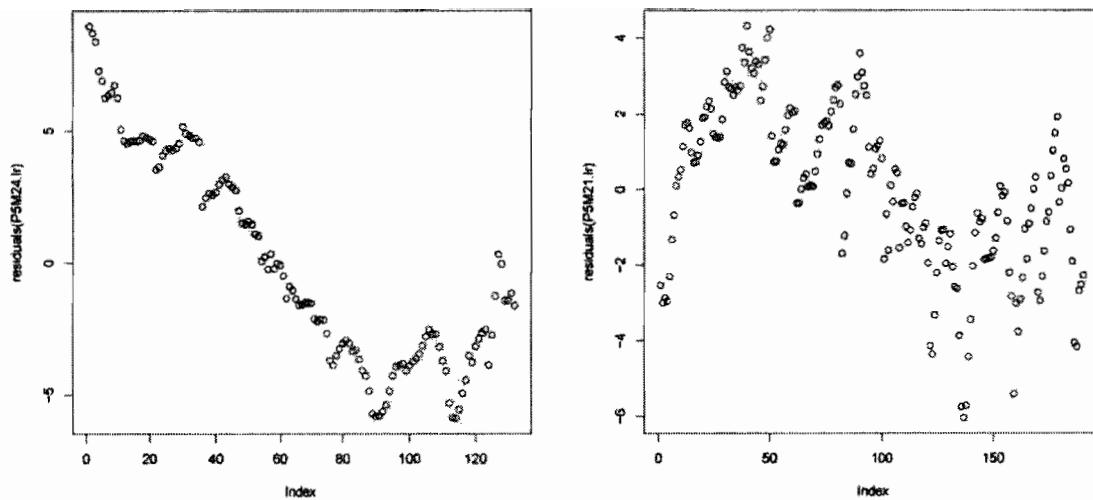


Figure 36 : Résidus des régressions linéaires El Houareb5-M24, El Houareb5-M21.

En essayant de résoudre le problème de l'incohérence des résultats obtenus, nous avons décidé de prendre des données qui couvrent une même période. Nous avons choisi l'année de 1994 comme le début des mesures prises, étant donné que les données disponibles sont maximales pendant la période 1994-2009. Dans un deuxième temps, il a fallu choisir un pas de temps régulier et unique pour toutes les chroniques testées. Mais ce choix n'était pas facile parce que les chroniques piézométriques avaient toutes des valeurs qui variaient entre des valeurs mensuelles, semestrielles et annuelles. Cette hétérogénéité des pas de temps nous a obligés à prendre un pas de temps de 6 mois comme référence. Les deux mois pour les quels les mesures des niveaux étaient maximale pour l'ensemble des piézomètres étaient les mois de juin et de décembre (nous avons choisi deux mois opposants dans l'année pour essayer le plus représenter les variabilités saisonnières).

Les résultats de la deuxième régression sont montrés en Annexes (19, 20, 21, 22, 23). Nous en monterons dans la figure (37) un exemple.

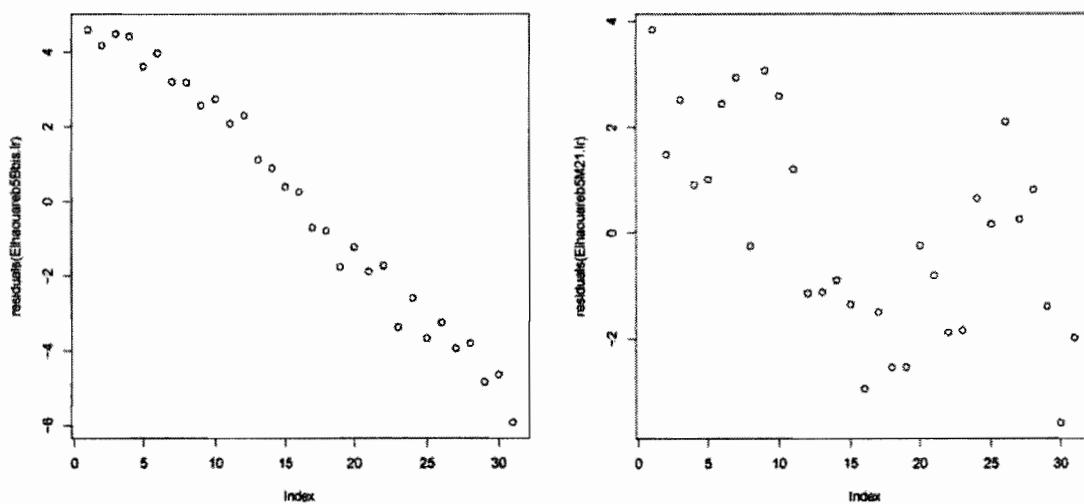


Figure 37 : Résidus des régressions linéaires El-Houareb5-Bbis, El Houareb5-M21.

En effet, les résidus obtenus par la deuxième fois n'étaient pas meilleurs que ceux précédents. Ils avaient naturellement les mêmes tendances de baisses et nous ne pouvons pas les considérer comme des bruit blanc.

Dans un dernier essai de résoudre ce problème, nous avons essayé de faire une régression linéaire par rapport au piézomètre M28, en supposant qu'il pourrait être représentatif de l'évolution des apports à long terme. Pour ce faire, nous avons pris les données utilisées dans le deuxième essai, cet-à-dire les données mensuelles. Dans la figure (38) nous en présentons un exemple.

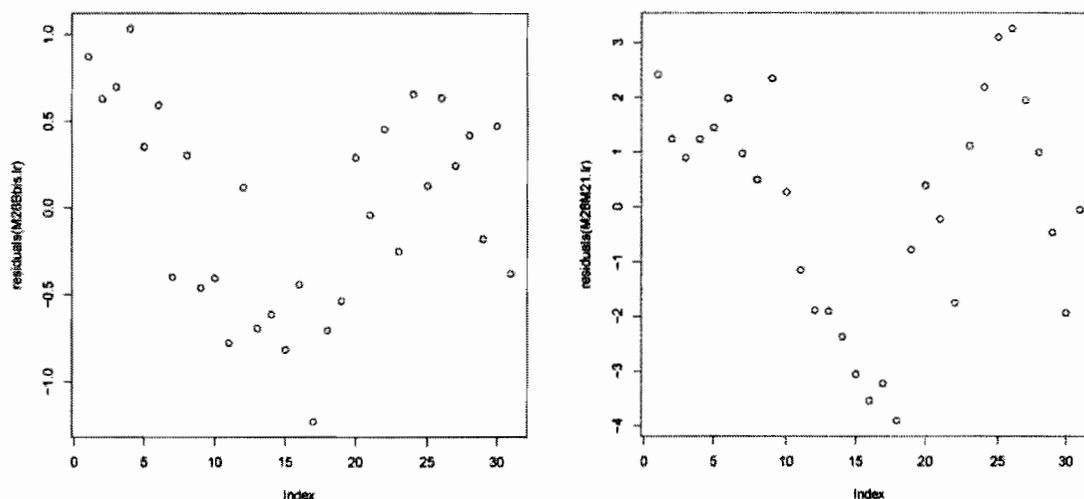


Figure 38 : Résidus des régressions linéaires M28-Bbis, M28-M21.

Cette fois ci, les résidus étaient différents de ceux des deux essais précédents, mais le résultat est le même. Les résidus avaient une tendance de changer de signal avant et après la période 2001-2002, ce qui n'a pas du tout de signifiante. Ils bousculaient pas autour d'un axe horizontal et ne représentaient pas du un comportement d'un bruit blanc.

III – 2 – 3 – 1 – 3 – Conclusion

Le fait d'avoir essayé la méthode du bruit blanc à la fin du stage, n'a pas permis de pouvoir essayer de travailler suffisamment sur cette méthode. Il s'est révélé que l'application des régressions linéaires n'était pas du tout adéquate du fait que les lignes obtenues ne peuvent pas dans aucun cas représenter une variabilité interannuelle, c'est pour cela que les résidus obtenus avaient des tendances évidentes de baisse. Donc, il se peut qu'une régression linéaire ait été plus adéquate à appliquer, mais la manque à la fois d'assez du temps pour l'essayer et d'assez des données nous n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse.

En fin, nous répétons ce que nous avons conclu plus haut, c'est que l'application des méthodes statistiques sur des séries chronologiques n'est pas toujours utile à appliquer sur des chroniques piézométriques du fait que ces méthodes ne prennent pas en compte les particularité des milieux du souterrain.

Conclusion générale

La nappe de Kairouan subit une baisse continue depuis la fin des années 70. Les causes principales de cette baisse sont à la fois une diminution des quantités entrant à la nappe, surtout après la fermeture du barrage El Haouareb qui a privé la nappe des apports par infiltration des crues, et qui a changé le système de recharge de la nappe d'une telle façon que les apports à la nappe sont devenus quasiment uniquement ceux par écoulement souterrain à travers le seuil d'El Haouareb. La deuxième cause probable de la surface de la nappe que la littérature propose est l'augmentation des prélèvements pour l'agriculture au cours des années, qui ont engendré la surexploitation de la nappe.

Au cours de ce stage nous avons essayé de mieux comprendre les facteurs influençant la piézométrie observées dans notre zone d'étude : le sous bassin aval du Merguellil, qui occupe la moitié Nord de la plaine de Kairouan. Nous avons utilisé deux méthodes différentes : une analyse graphique de la piézométrie et une analyse statistique. Pour les deux méthodes nous avons considéré que les apports principaux à la nappe étaient ceux par écoulements souterrains. Nous avons représenté les variations des apports par la chronique piézométrique du piézomètre El Haouareb5 qui se trouve dans le même seuil karstique du barrage. Ce choix a été fait après avoir trouvé une bonne corrélation entre la chronique d'El Haouareb 5 et celle de la cote d'eau dans la retenue.

L'analyse graphique de la piézométrie a révélé que la zone d'influence du barrage s'étale jusqu'à une distance d'environ 12 km dans la plaine. C'est dans cette bande que le comportement des piézomètres montrait une bonne concordance avec les variations des apports. Ensuite plus à l'aval, l'observation de la piézométrie a montré des fluctuations saisonnières qui se différiaient des fluctuations observées à l'amont. La première hypothèse retirée était que ces fluctuations correspondaient à des prélèvements par pompage. Mais, cette conclusion a été confrontée par le fait que de telles fluctuations saisonnières de la piézométrie s'observent pendant les années 70 où la littérature dit que le nombre des pompes était très limité. Donc, nous avons eu du mal à relier les baisses à l'aval et les variations saisonnières de la surface de la nappe uniquement aux prélèvements. Dans ce cas, l'analyse graphique seule n'était pas suffisante pour mieux comprendre ce phénomène. C'est pour cela que nous avons cherché à analyser les chroniques piézométriques avec les méthodes statistiques.

Concernant les analyses statistiques, elles nous ont pas donné de réponse sur la relation entre les comportements observés de la piézométrie et les variations des apports souterrains. Cela est dû sans doute à plusieurs raisons dont les plus importantes étaient la pertinence de l'application de ces méthodes sur des chroniques piézométriques et la manque importante d'assez de données.

En effet, n'ayant pas fait d'étude sur la propagation des écoulements souterrains dans la plaine, nous n'avons pas été capable de déterminer d'une façon stricte la part de la baisse de la piézométrie qui était due au pompage. A cela s'ajoute les obstacles administratifs qui nous ont empêchés d'effectuer une visite de terrain qui était par contre importante pour mieux connaître la zone d'étude d'un côté, et d'un autre pour ramasser plus de données et pour apprendre des techniques qui nous auraient été utiles pour enrichir nos analyses. Cela était nécessaire surtout concernant le côté agronome de notre travail pour lequel nous n'avions que peu de données qui ne nous permettait pas de travailler avec.

En fin, nous signalons que les travaux effectués durant ce stage seront enrichis et affinés dans un deuxième stage qui servirait comme préparation à une thèse qui se portera sur la même zone

d'étude et qui, à priori, s'intéressera à étudier le bilan hydrique du sous-bassin aval du Merguellil. A cet effet, nous bénéficierons des résultats des études qui sont en cours actuellement sur la zone, notamment la thèse de Lazard M., qui étudie le dynamique de la recharge de la nappe par écoulements souterrains à travers le seuil karstique d'El Haouareb. Cette étude améliorerait nos connaissances sur les quantités d'eau arrivant à la nappe.

Références bibliographiques

- Abourida A., Razoki B., Errouane S., Leduc C., Prost J.P., 2003. Impact de l'irrigation sur la piézométrie du secteur N'fis au Haouz Central de Marrakech (Maroc). *Hydrology of the Mediterranean and semiarid regions*. IAHS publ. 278, 389-395.
- Albouchi L., 2006. Gestion de l'eau en Tunisie : d'une politique de mobilisation à une politique de réallocation de la ressource selon sa valorisation économique. Cas du bassin versant de Merguellil, Tunisie Centrale. Thèse de doctorat, Université de Montpellier I.
- Aouadi C., 2004. Analyse de la piézométrie de la nappe de Kairouan de 1967 à 2004. Rapport INAT-IRD du programme MERGUSIE 2.
- Aouadi C., 2005. Analyse préliminaire des cartes piézométriques de la nappe de Kairouan (à différentes dates : 1969, 1970, 1977 et 1987). Rapport INAT-IRD du programme MERGUSIE 2.
- Aouadi C., 2006. Réinterprétation des essais de pompage dans la nappe de Kairouan. Rapport INAT-IRD du programme MERGUSIE 2.
- Ben Ammar S., Zouari K., Leduc C., M'barek J., 2006. Caractérisation isotopique de la relation barrage-nappe dans le bassin de Merguellil (plaine de Kairouan, Tunisie centrale). *Journal des Sciences Hydrologiques*, 51(2), 272-284.
- Ben Ammar S., 2007. Contribution à l'étude hydrogéologique, géochimique et isotopique des aquifères de Aïn el Beidha et du bassin du Merguellil (Plaine de Kairouan) : implications pour l'étude de la relation barrage-nappes. Thèse, Université de Sfax, Tunisie.
- Ben Ammar S., Jeribi L., Favreau G., Zouari K., Leduc C., Oi M., M'barek J., Beji R., 2009. Evolution de la recharge de la nappe phréatique de la plaine de Kairouan (Tunisie centrale) déduite de l'analyse géochimique. *Sécheresse* 20, 1, 87-95.
- Besbes M., 1971. Détermination par essais de pompage du coefficient d'emmagasinement en nappe phréatique alluviale, cas de la nappe de Kairouan. Rapport, DRES, Tunis, Tunisie.
- Besbes M., de Marsily G., 1976. L'analyse d'un grand réservoir aquifère en vue de sa modélisation. In Conférence AIH – L'hydrologie des grands bassins sédimentaires, Budapest, Hongrie.
- Bouzaïane S. Lafforgue A., 1986. Monographie des oueds Zeroud et Merguellil. Rapport Scientifique ORSTOM/DGRE, Tunis, Tunisie.
- Brockwell P.J., et Davis R.A., 2002. *Introduction to time series and forecasting*. Second edition. Springer texts in statistics, New York, P16.
- Casa R., Rossi M., Sappa G., Trotta A., 2008. Assessing cropWater demand by remote sensing and GIS for the Pontina plain, central Italy. *Water resour. Manage.* (2009) 23:1685–1712 DOI 10.1007/s11269-008-9347-4.
- Chaieb H, 1990. Modèle de Kairouan : effet de la fermeture des barrages et des lâchures d'eau dans les lits des oueds sur les nappes de Kairouan. Rapport DGRE, Tunis.
- CIHEAM, 2005. Rapport annuel 2005. "Agriculture, pêche, alimentation et développement rural durable dans la région méditerranéenne", Portugal.

- CIHEAM, 2006. L'agriculture est un secteur stratégique en Méditerranée. Les notes d'analyse du CIHEAM N°18 – Décembre 2006, Caire, Egypte.
- Estienne P., Godard A., 1970. Climatologie, Paris, Armand Colin, Collection U.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56, Rome.
<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Feuillette S., 2001. Vers une gestion de la demande sur une nappe en accès libre: exploration des interactions ressource usages par les systèmes multi-agents. Application à la nappe de Kairouan, Tunisie centrale. Thèse, Université de Montpellier II, Montpellier, France.
- Garetta Ph., Ouerghemmi A., 1998. Note sur l'envasement du barrage d'El Haouareb. IRD, Tunisie.
- Géroudet C., 2004. Démographie et histoires agraires du bassin versant du Merguellil, Tunisie Centrale. Rapport de stage INAPG – IRD – IWMI du programme MERGUSIE 2.
- Human Development Report, 2009. United Nations Development Programme.
- Irrigation – Guides pratique – 3^{ème} édition, Cemagref Edition, 2003.
- Kingumbi A., Besbes M., Bourges J., Garetta P., 2004. Evaluation des transferts entre barrage et aquifères par la méthode de bilan d'une retenue en zone semi-aride. Cas d'El Haouareb en Tunisie centrale. Revue des Sciences de l'Eau 17, 213-225.
- Kingumbi A., Bargaoui Z., Hubert P., 2005. Investigation of the rainfall variability in central Tunisia. Journal des Sciences Hydrologiques, Vol. 50, N°3, pp. 493-508.
- Leduc C., Virrion R., 2007. Rapport descriptif du bassin du Merguellil-Tunisie Centrale : Caractéristiques et gestion de l'eau. Note technique du programme MERGUSIE 2.
- Le Goulven P., Leduc C., Bachtta M.S., Poussin J-C., 2009. Sharing scarce resources in a mediterranean river basin: Wadi Merguellil in Central Tunisia. In Molle, F. and Wester, P. (eds), River Basin Trajectories: Societies, Environments and Development, Chap. 7, p. 147-170. Wallingford, UK: CABI.
- Nazoumou Y., Besbes M., 2001. Estimation de la recharge et modélisation de nappe en zone aride : cas de la nappe de Kairouan, Tunisie. Impact of human activity on groundwater dynamics. IAHS publ. 269, 75-88.
- Nazoumou Y., 2002. Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride. Etude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan. Thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar.
- Poussin J-C., Imache A., Beji R., Le Grusse P., Benmihoub A., 2008. Exploring regional irrigation water demand using typologies of farms and production units: An example from Tunisia. Agricultural Water Management 95, 8, 973-983.
- Plan Bleu, 2004. L'eau des méditerranéens : situation et perspectives. MAP Technical Report Series, 158.
- Plan Bleu, 2008. Rapport Annuel – 2008, Valbonne, France.

Plan Bleu, 2009. La Méditerranée doit relever trois défis majeurs pour gérer durablement ses ressources en eau menacées. Notes du Plan Bleu, N°11 février 2009.

Tchatagba A., 1998. Bilan des apports du Merguellil à Hafouz et sédimentation de la retenue d'El Haouareb. Projet de fin d'étude d'ingénieur, Ecole supérieur des ingénieurs de l'équipement rural, Medjez El Bab, Tunisie.

Virrion R., 2006-a. Contribution à l'étude hydrogéologique du site d'El Haouareb – Merguellil – Tunisie Centrale. Mémoire de master 2, Université d'Avignon.

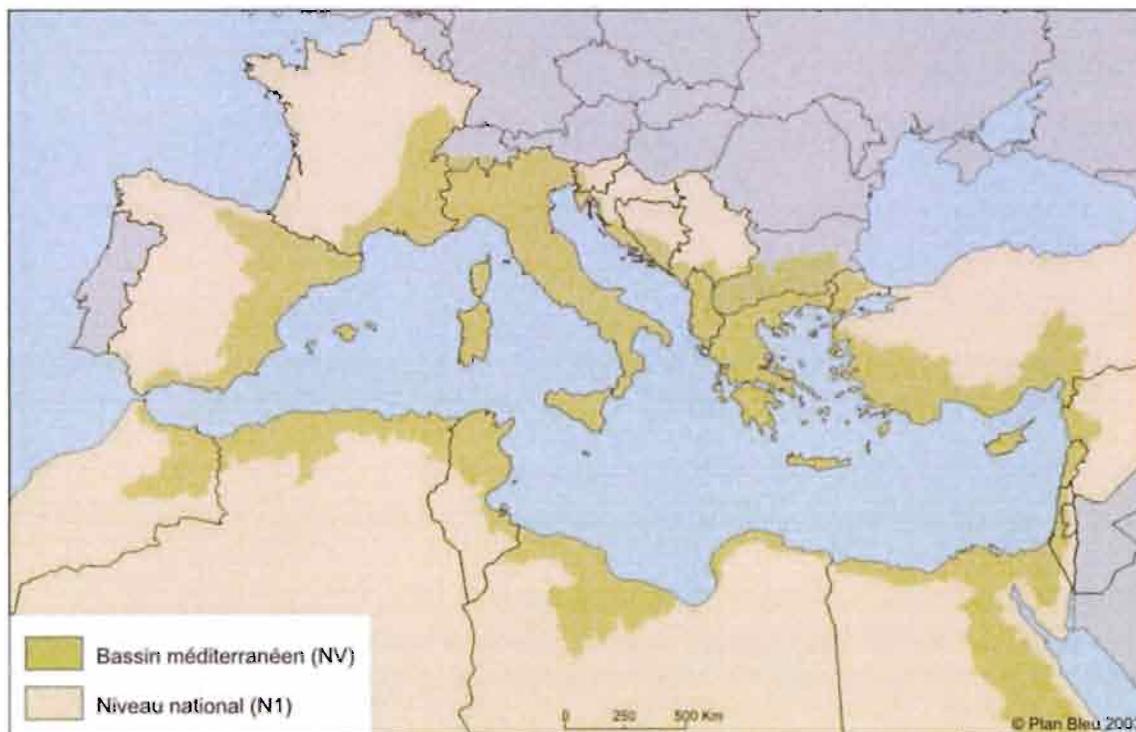
Virrion R., 2006-b. Etude et modélisation de l'envasement du barrage El Haaouareb, Merguellil, Tunisie centrale. Rapport technique IRD, Tunisie.

World population prospects, the 2008 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs (DESA) Population Division, Population Estimates and Projections Section.

http://esa.un.org/unpd/wpp2008/peps_period-indicators.htm

Annexes

Annexe 1 : Bassins versants méditerranéens. (Plan bleu, 2004)

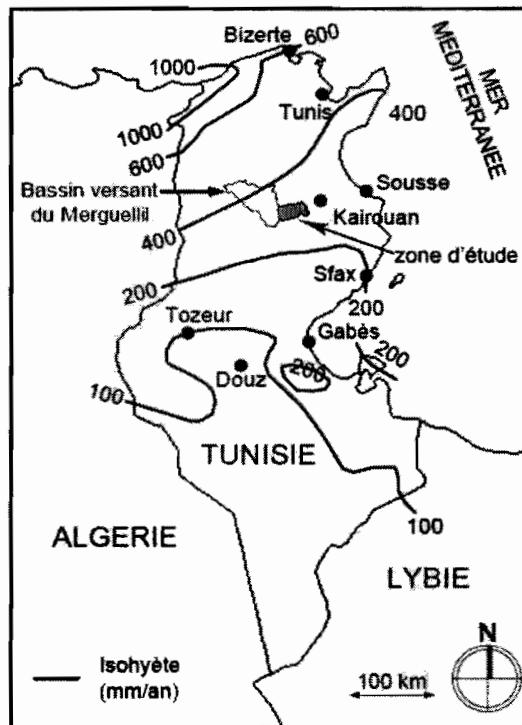


Annexe 2 : Sites de surexploitation d'eau souterraine dans le bassin méditerranéen et l'intrusion saline. Plan Bleu (2003)



Source : RIVM RIZA 1991. Sources nationales compilées par le Plan Bleu

Annexe 3 : Répartition des pluies en Tunisie.



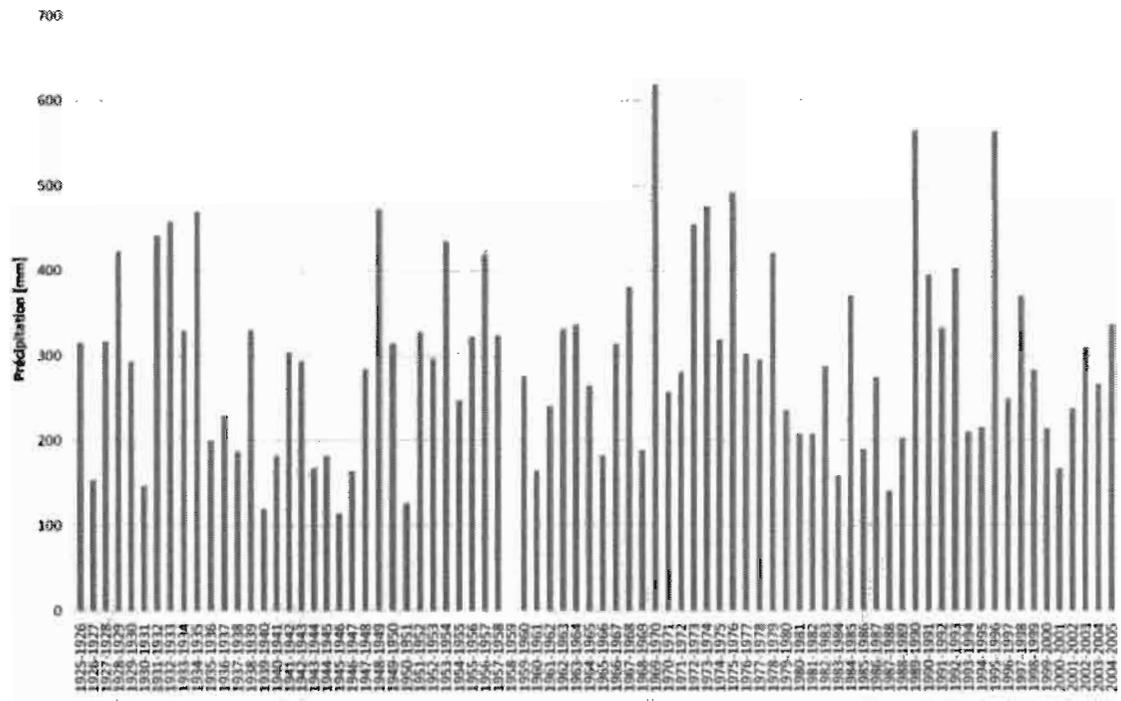
Annexe 4 : Méthode de Penman-Monteith pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle ET_0 .

$$ET_0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times U_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times U_2)}$$

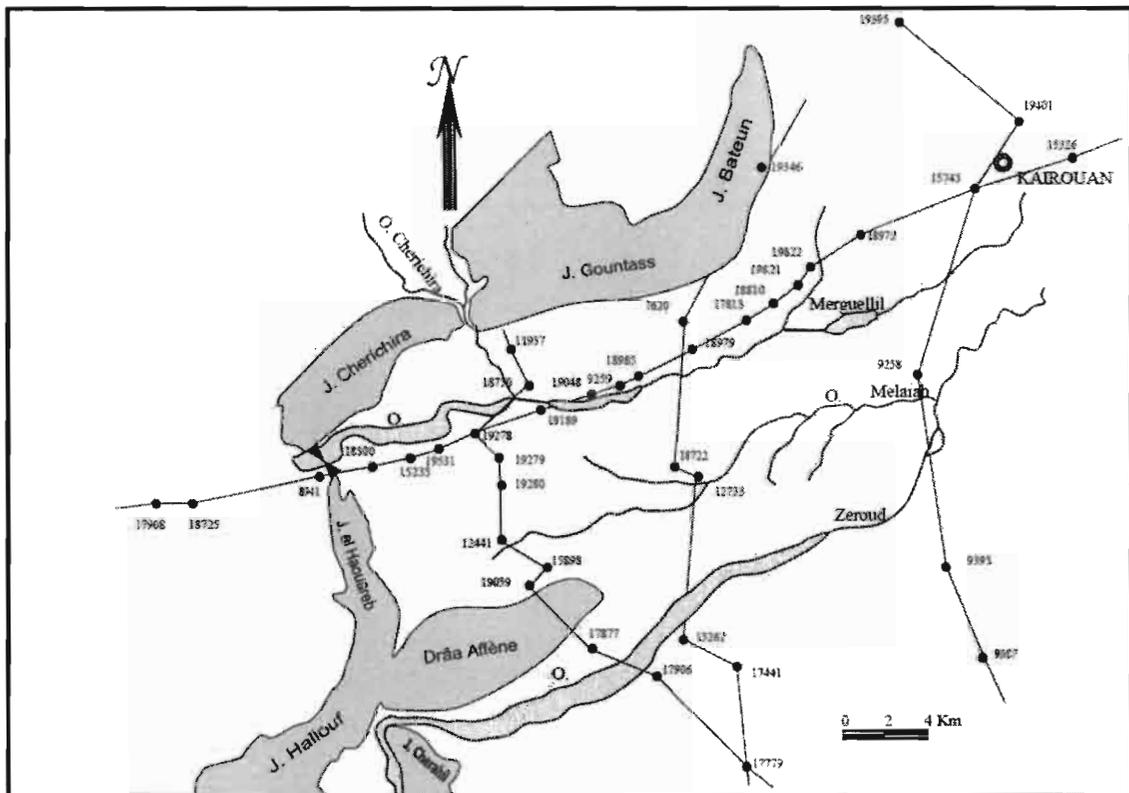
Avec :

- ET_0 Evapotranspiration potentielle [mm day^{-1}]
- R_n Radiation net à la surface des cultures [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]
- G_n Densité de flux de chaleur du sol [$\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$]
- T Température moyenne journalière à une altitude de 2 m du sol [$^{\circ}\text{C}$]
- U_2 Vitesse du vent à une altitude de 2 m du sol [m s^{-1}]
- e_s Pression de vapeur saturante [kPa]
- e_a Pression partielle de la vapeur [kPa]
- Δ Pente de la courbe représentative de la fonction $f : e_s=f(T)$ [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]
- γ Constante psychométrique [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$]

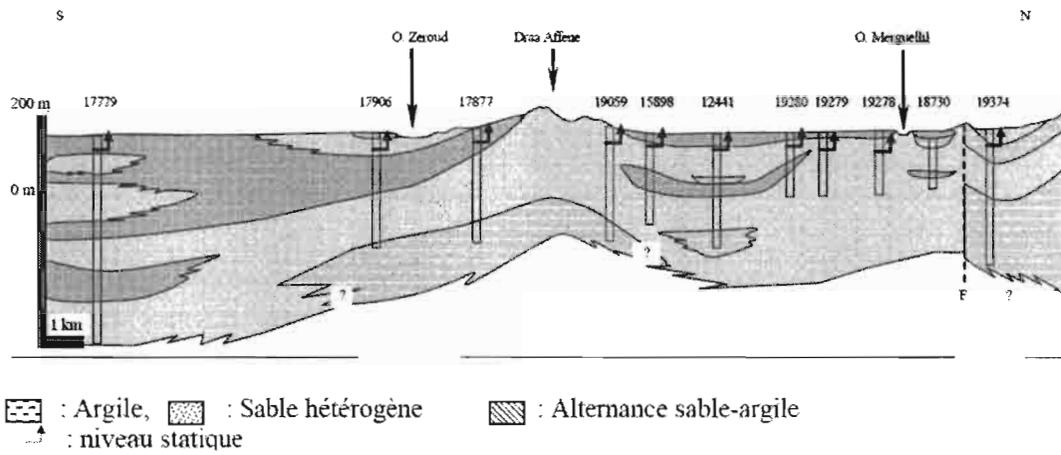
Annexe 5 : Précipitations annuelles mesurées à Kairouan.



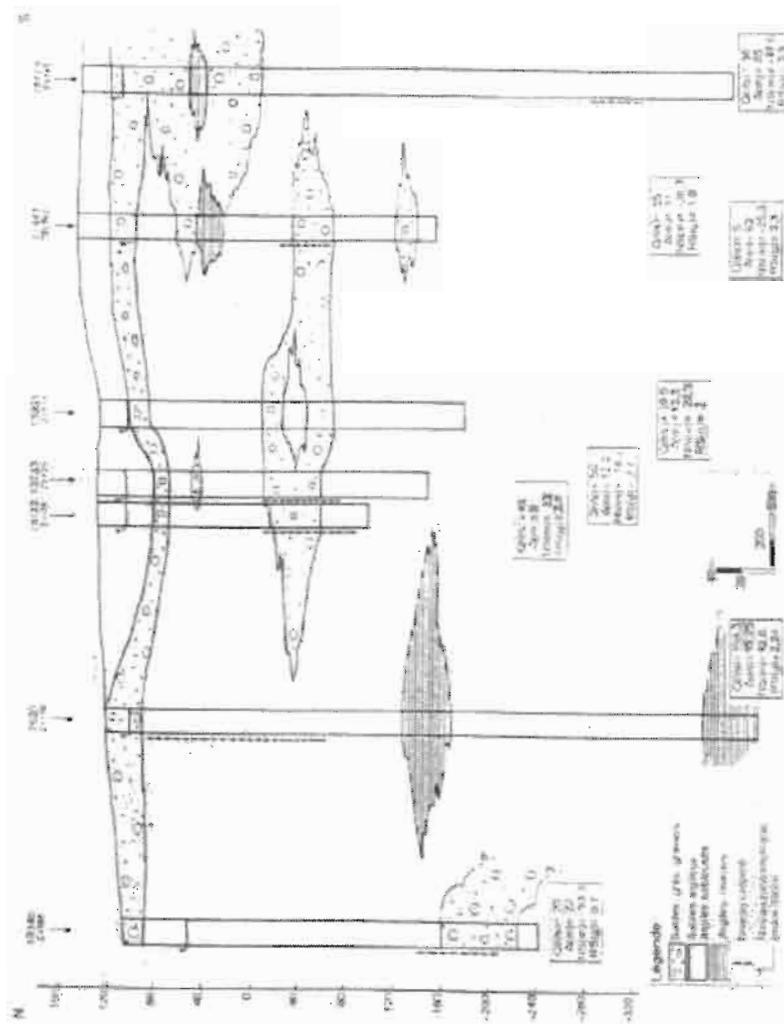
Annexe 6 : Coupes lithologiques : carte de situation des coupes (Ben Ammar, 2007)



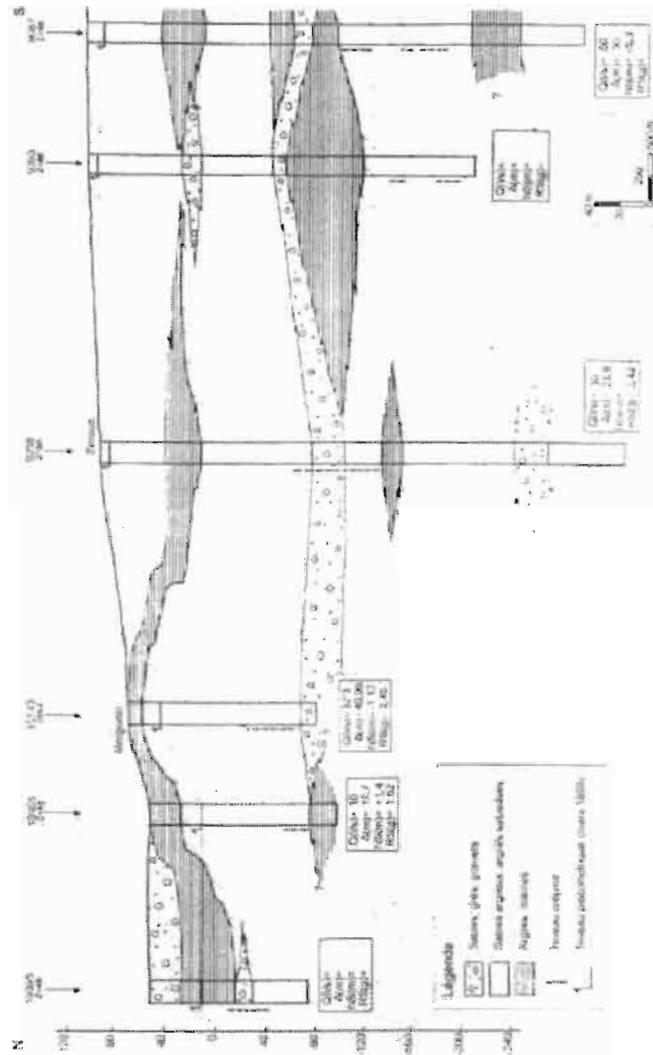
Annexe 7 : Coupes lithologiques, corrélation Nord-Sud de la partie Ouest (Ben Ammar, 2007)



Annexe 8 : Coupes lithologiques, corrélation Nord-Sud de la partie médiane (Ben Ammar, 2007)



Annexe 9 : Coupes lithologiques, corrélation Nord-Sud de la partie Est (Ben Ammar, 2007)



Annexe 12 : Périodes d'observation des piézomètres.

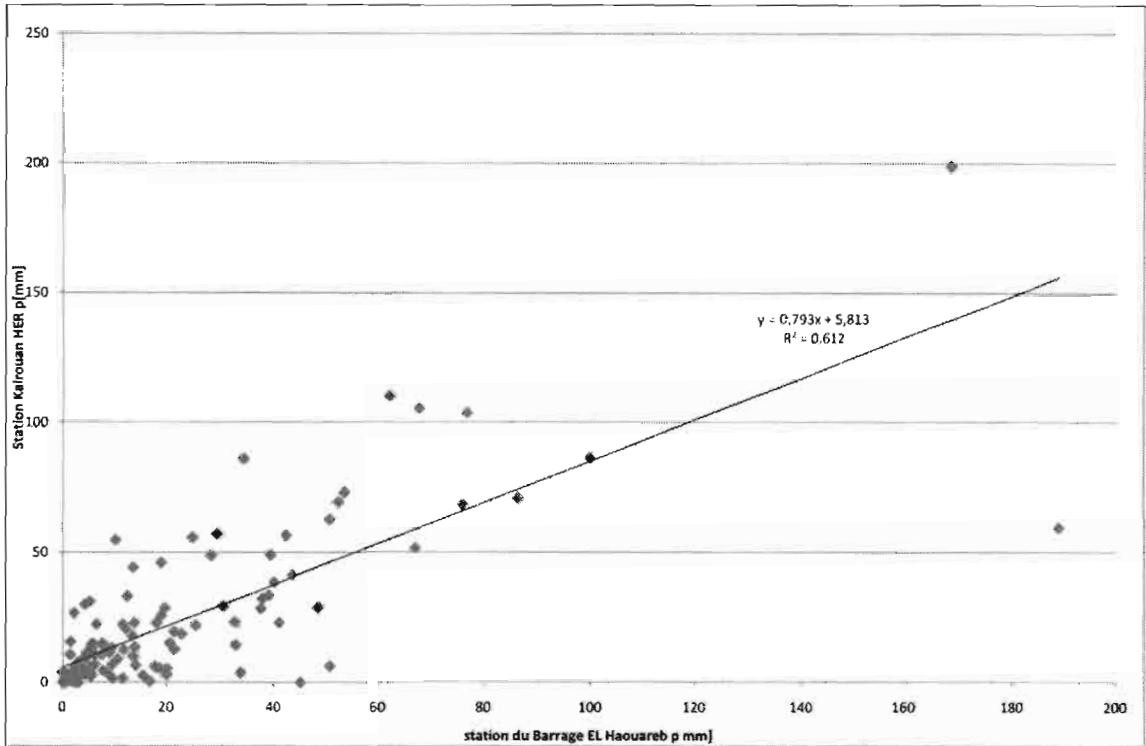
	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
A																								
Abis																								
B																								
Bbis																								
Bir Chébkia																								
C																								
Cbis																								
Obs																								
E																								
Ebis																								
El Medaina																								
El Fergata																								
El Houareb5																								
Houfle1																								
M																								
M1																								
M2																								
M2bis																								
M3bis																								
M5																								
M7																								
M7bis																								
M8																								
M9																								
M10																								
M10bis																								
M11																								
M11bis																								
M12																								
M13																								
M14																								
M15																								
M16																								

	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	
M17																								
M17bis																								
M18																								
M18bis																								
M19																								
M20																								
M21																								
M22																								
M23																								
M23bis																								
M23ter																								
M24																								
M28																								
M29																								
M30																								
Mbis																								
N																								
P1 Elgrine																								
P1 Elgrine bis																								
Q																								
R8																								
R12																								
Z1																								
Z1bis																								
Z3																								
Z3bis																								
Z3ter																								
Z5bis																								
Z6																								
Z6bis																								
Z13																								
Z15																								
Z16																								

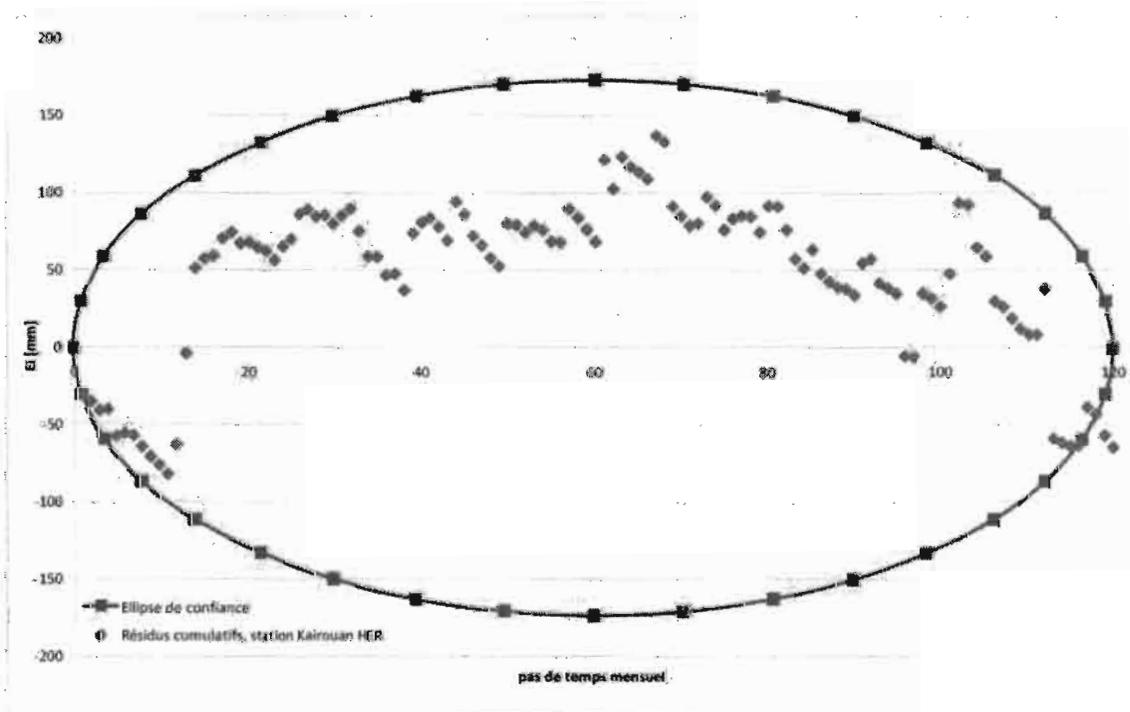
	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
A																						
Abis																						
B																						
Bbis																						
Br Chérika																						
C																						
Cbis																						
Dbis																						
E																						
Ebis																						
El Medina																						
El Fouga																						
El Hanaureb5																						
Houfa1																						
M																						
M1																						
M2																						
M2bis																						
M3bis																						
M5																						
M7																						
M7bis																						
M8																						
M9																						
M10																						
M10bis																						
M11																						
M11bis																						
M12																						
M13																						
M14																						
M15																						
M16																						

	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	
M17																						
M17bis																						
M18																						
M18bis																						
M19																						
M20																						
M21																						
M22																						
M23																						
M23bis																						
M23ter																						
M24																						
M28																						
M29																						
M30																						
Mbis																						
N																						
P1 Elgrine																						
P1 Elgrine bis																						
Q																						
X5																						
X12																						
Z1																						
Z1bis																						
Z3																						
Z3bis																						
Z3ter																						
Z5bis																						
Z6																						
Z6bis																						
Z11																						
Z13																						
Z16																						

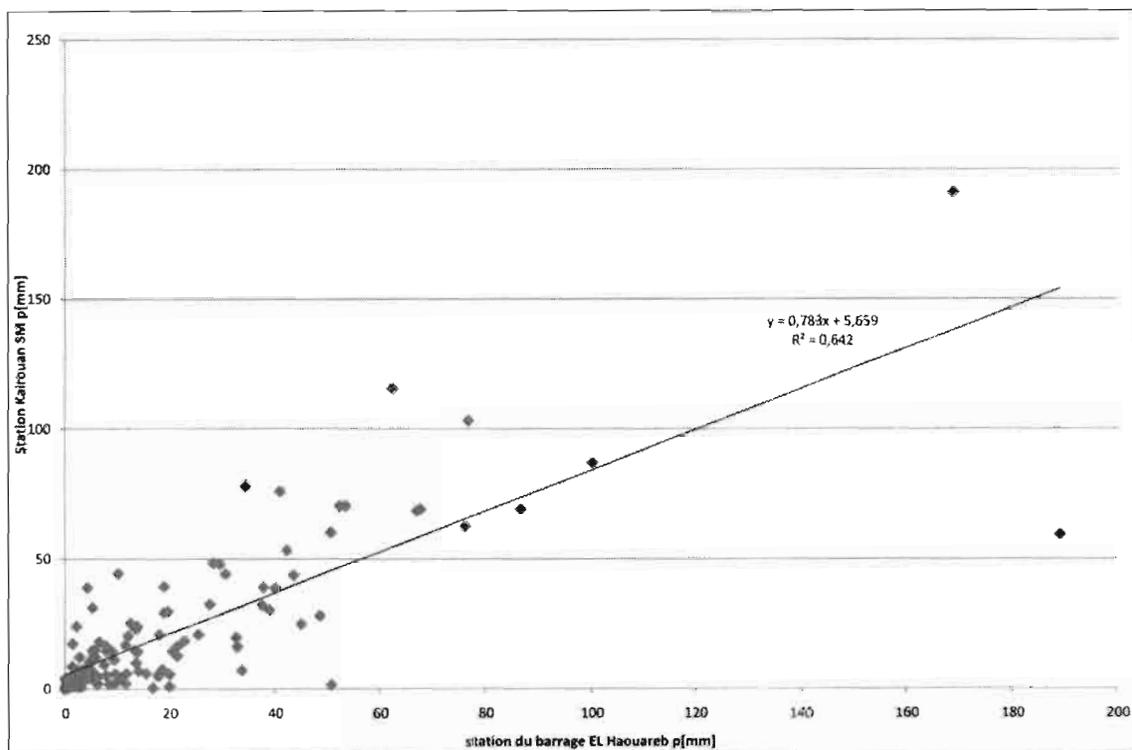
Annexe 13 : Corrélation linéaire entre les stations du barrage El Haouareb et de Kairouan HER.



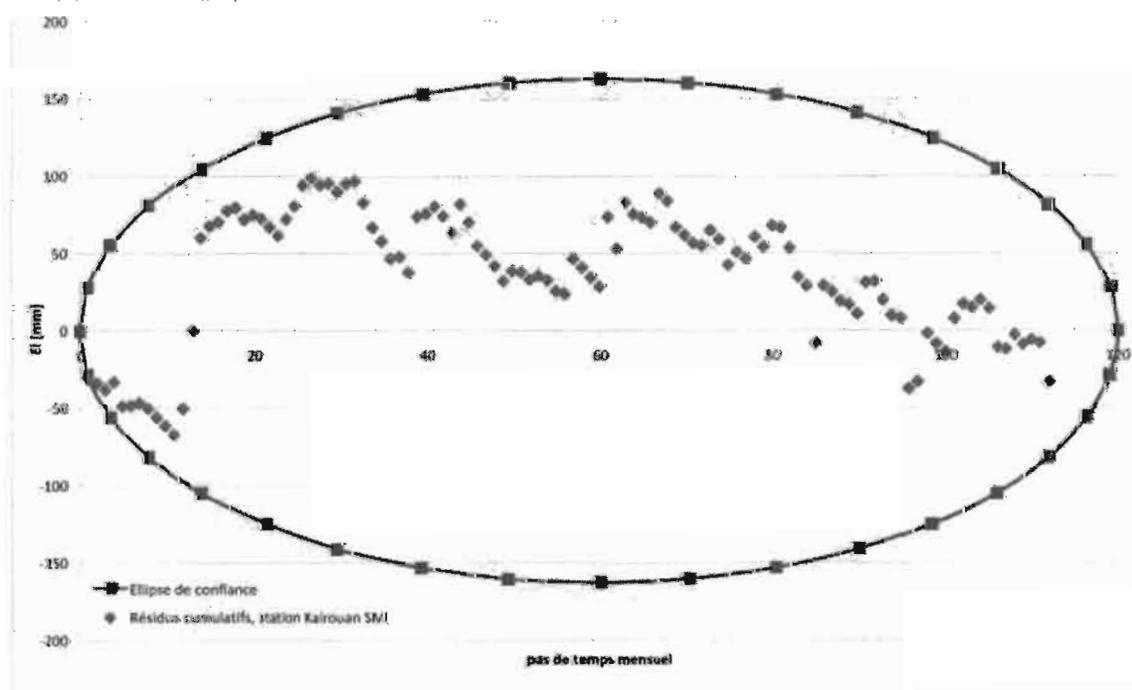
Annexe 14 : Test d'homogénéisation des chroniques pluviométriques enregistrées aux stations du barrage El Haouareb et de Kairouan HER.



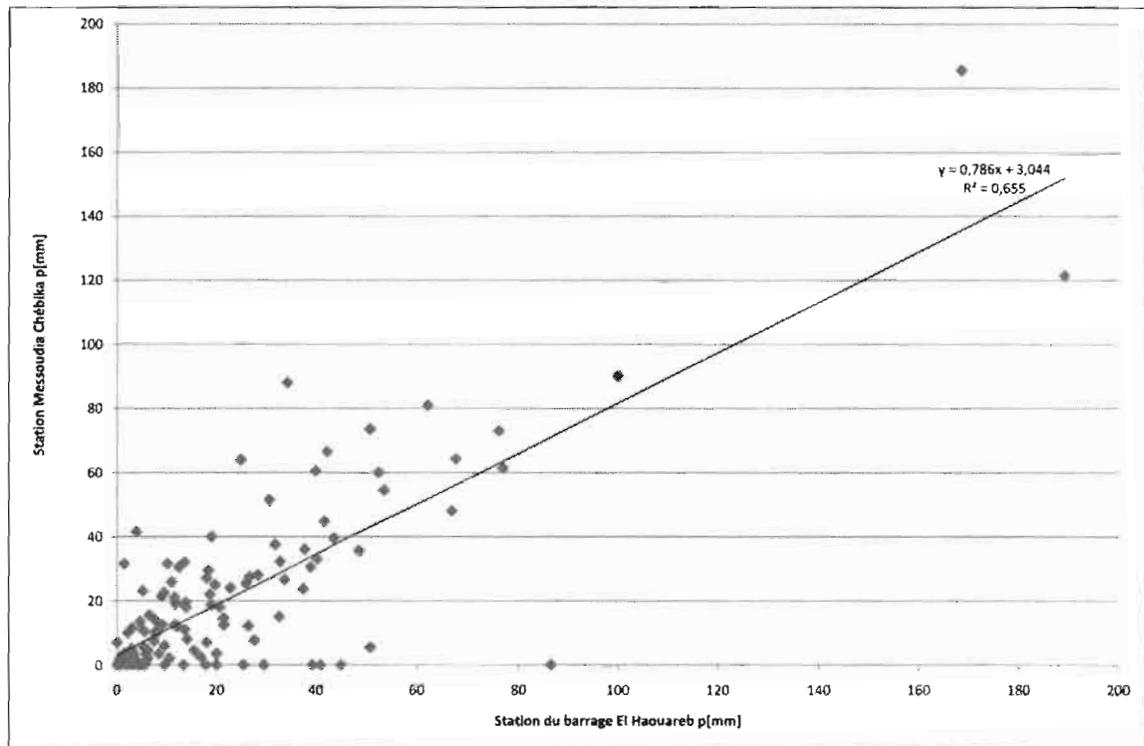
Annexe 15 : Corrélation linéaire entre les stations du barrage El Haouareb et de Kairouan SM.



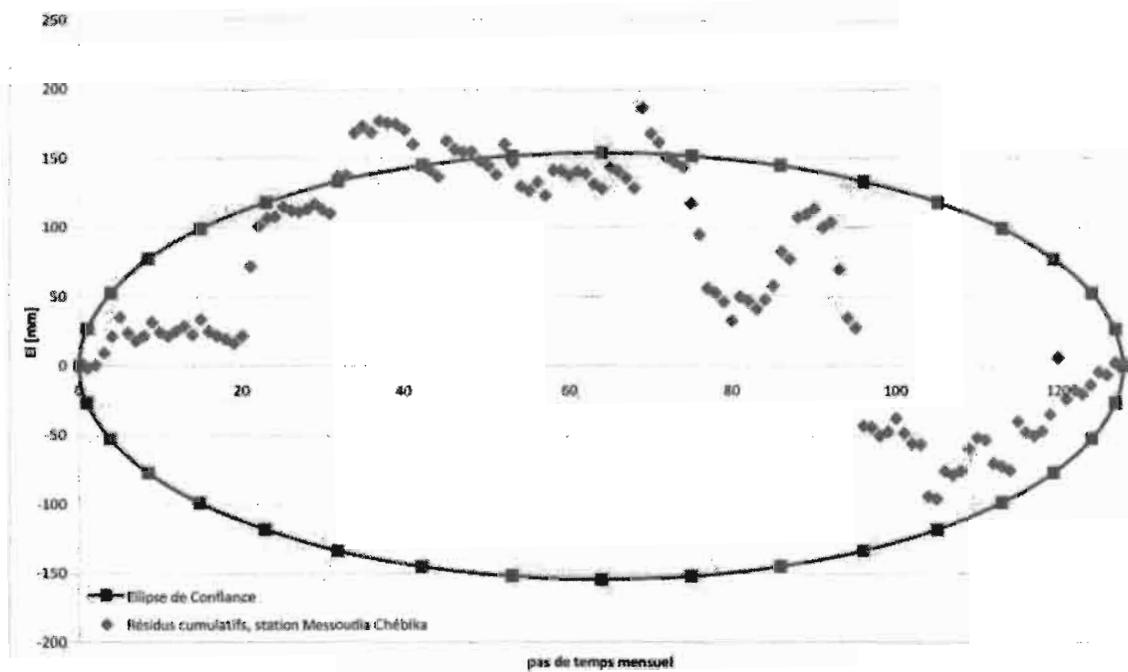
Annexe 16 : Test d'homogénéisation des chroniques pluviométriques enregistrées aux stations du barrage El Haouareb et de Kairouan SM.



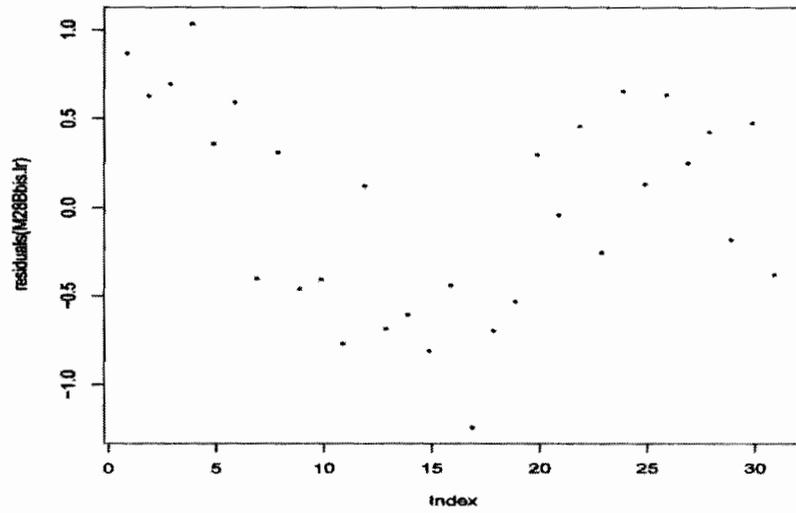
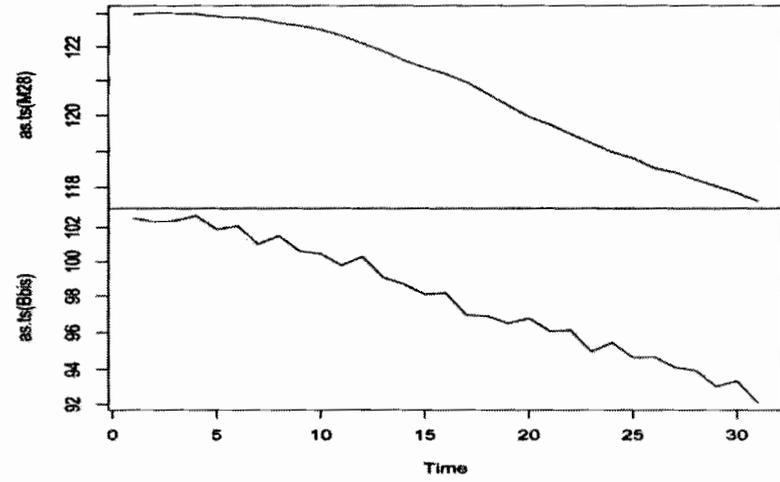
Annexe 17 : Corrélation linéaire entre les stations du barrage El Houareb et de Messoudia Chébika.



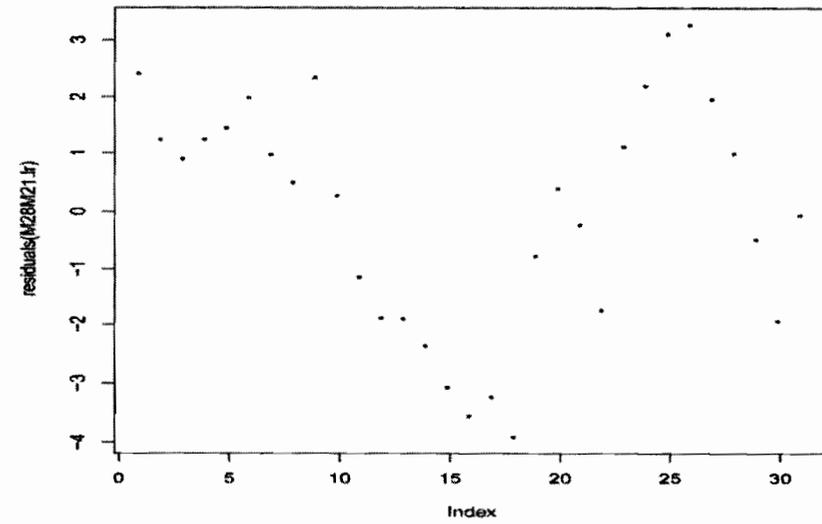
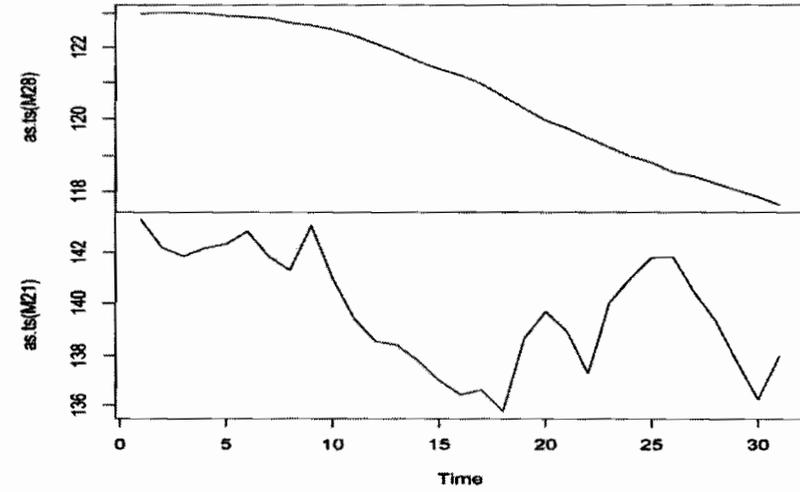
Annexe 18 : Test d'homogénéisation des chroniques pluviométriques enregistrées aux stations du barrage El Houareb et de Messoudia Chébika.



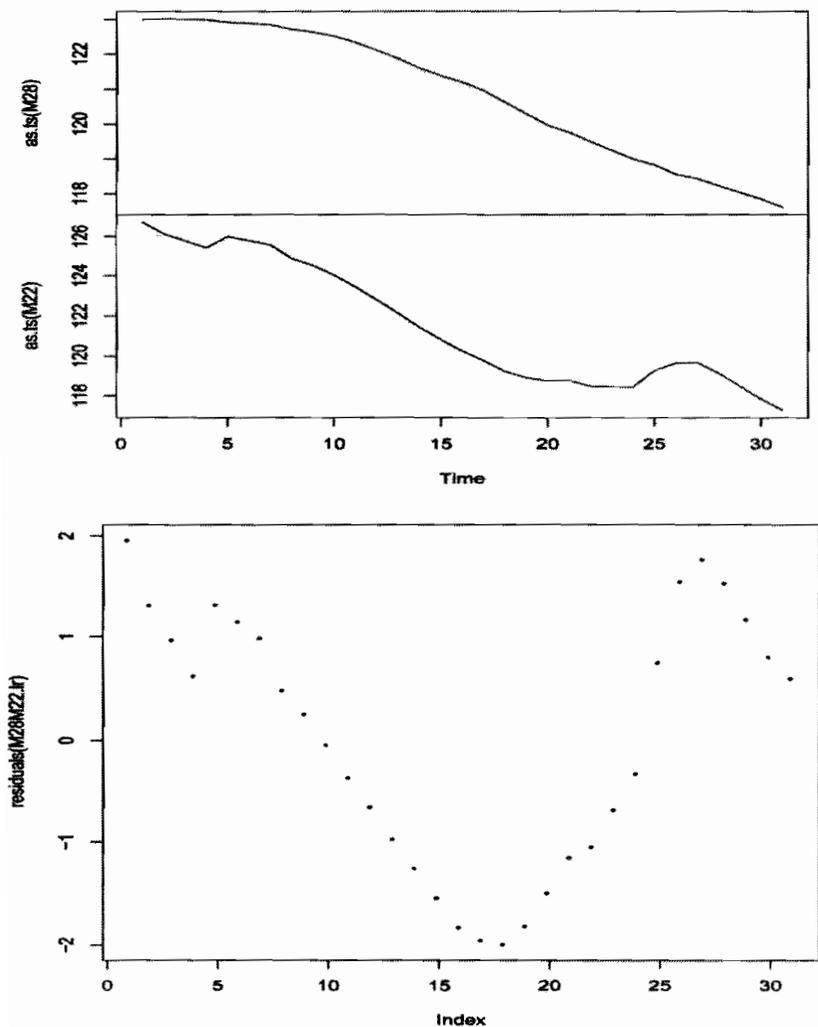
Annexe 19 : Résidus de la régression linéaire M28-Bbis.



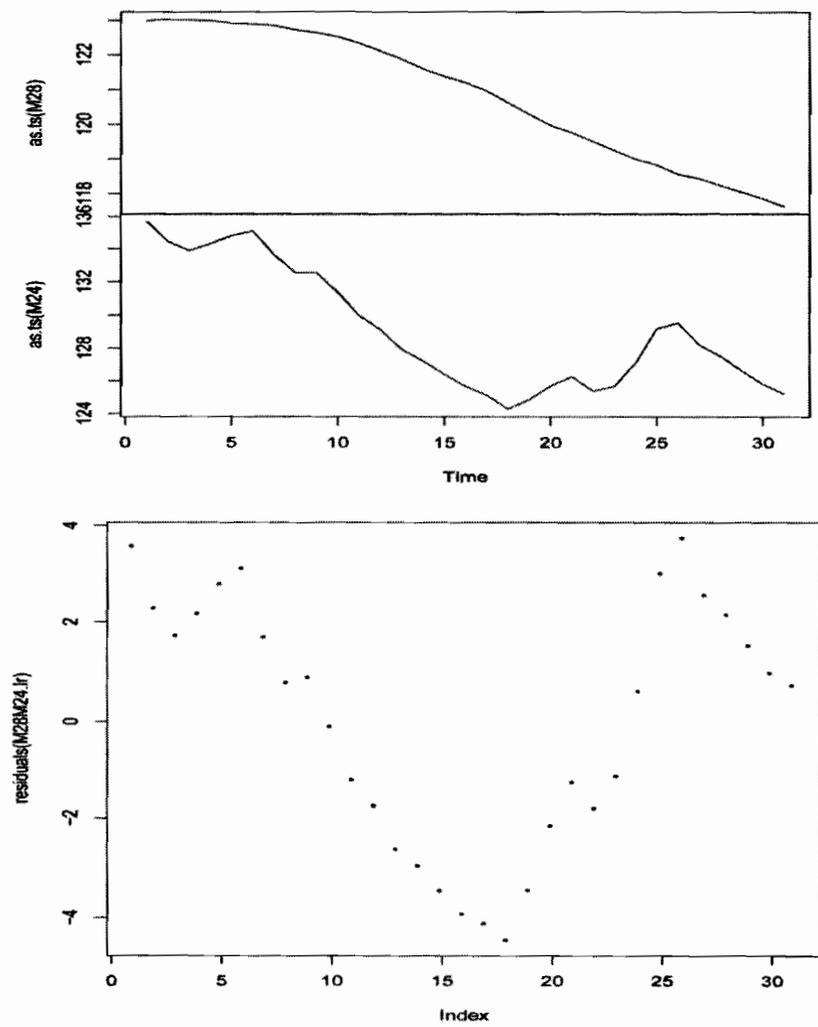
Annexe 20 : Résidus de la régression linéaire M28-M21.



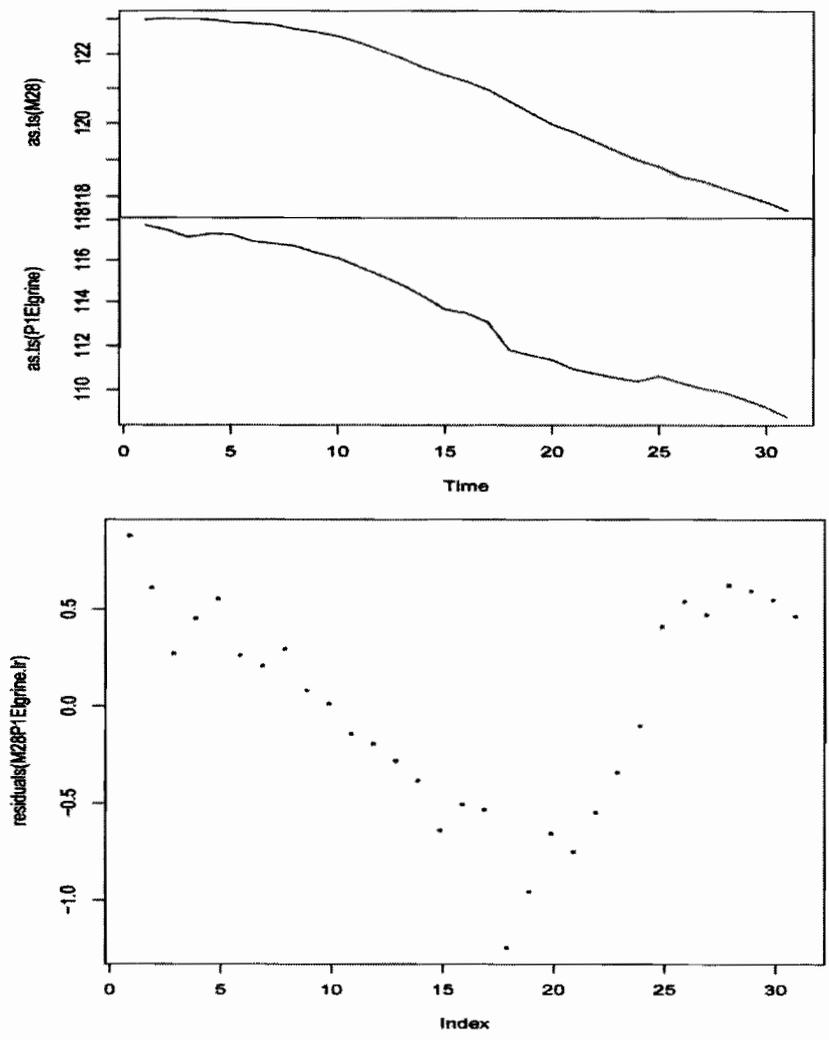
Annexe 21 : Résidus de la régression linéaire M28-M22.



Annexe 22 : Résidus de la régression linéaire M28-M24.



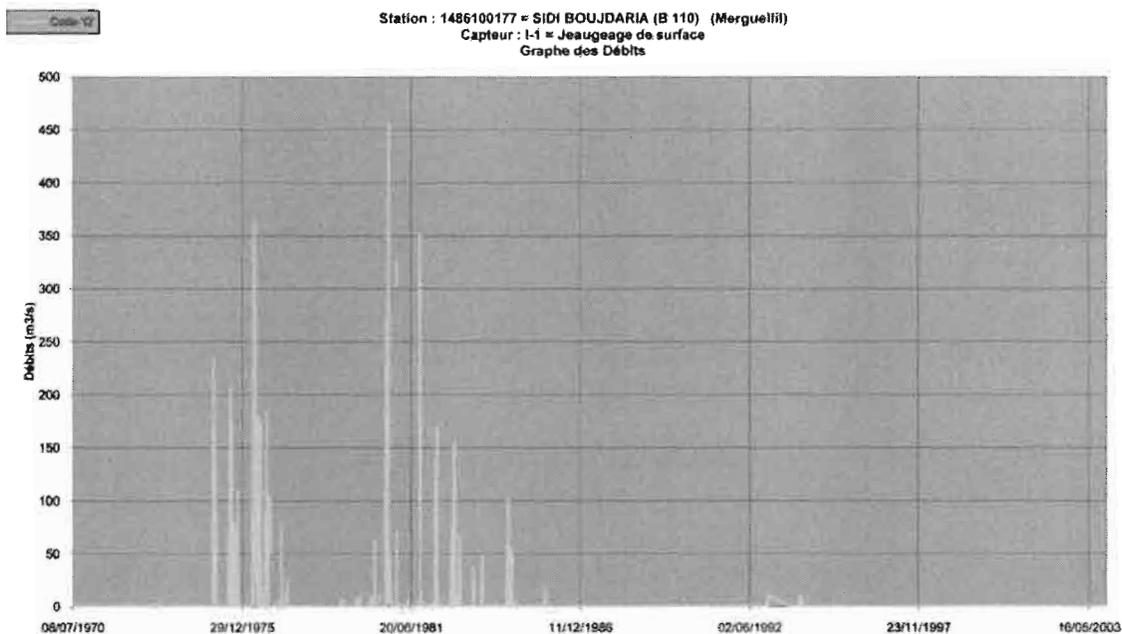
Annexe 23 : Résidus de la régression linéaire M28-P1 Elgrine.



Annexe 24 : Abaque Hauteur/Volume/Surface (Virrion, 2006-b)

cote (m)	1989		1994		1997		2002		2006	
	V (Mm ³)	S (Ha)								
200,00	1,624	110,27								
200,25	1,906	121,49								
200,50	2,215	133,21								
200,75	2,553	145,17								
201,00	2,922	158,14								
201,25	3,320	169,55								
201,50	3,745	179,80								
201,75	4,194	189,57								
202,00	4,666	199,66								
202,25	5,165	210,71								
202,50	5,689	220,80								
202,75	6,238	231,13								
203,00	6,813	241,66	3,695	184,00	0,077	26,74				
203,25	7,414	253,24	4,119	198,00	0,198	78,35				
203,50	8,045	265,50	4,543	212,00	0,455	105,07				
203,75	8,705	277,90	4,966	226,00	0,845	131,80				
204,00	9,395	290,12	5,390	240,00	1,331	158,53	0,000	60,00	0,009	5,42
204,25	10,115	303,07	6,119	254,75	1,857	185,25	0,256	115,75	0,029	11,63
204,50	10,868	316,67	6,848	269,50	2,417	206,09	0,579	142,69	0,072	24,12
204,75	11,655	330,88	7,576	284,25	3,098	228,22	0,972	172,20	0,155	50,04
205,00	12,479	348,32	8,305	299,00	3,631	250,67	1,440	202,34	0,332	96,77
205,25	13,409	360,66	9,111	314,25	4,283	270,72	1,978	227,18	0,634	148,81
205,50	14,338	373,01	9,918	329,50	4,963	288,94	2,573	248,39	1,042	183,82
205,75	15,268	385,35	10,724	344,75	5,672	304,70	3,215	264,65	1,528	212,67
206,00	16,20	397,70	11,530	360,00	6,408	329,50	3,896	299,01	2,076	236,17
206,25	17,290	411,28	12,441	378,25	7,172	348,15	4,670	318,06	2,682	260,72
206,50	18,383	424,85	13,353	396,50	7,967	366,80	5,444	337,10	3,361	295,33
206,75	19,475	438,43	14,264	414,75	8,796	385,45	6,217	356,15	4,115	317,97
207,00	20,57	452,00	15,175	433,00	9,668	404,10	6,991	375,20	4,909	332,17
208,00	25,52	510,70	19,758	510,00	13,833	487,13	10,795	456,66	8,432	390,87
209,00	31,05	569,20	24,900	569,00	18,876	569,20	15,654	540,54	12,802	497,38
210,00	37,11	627,70	30,835	628,00	24,753	627,70	21,562	633,06	18,125	596,45
211,00	43,68	686,20	37,408	686,20	31,236	686,20	28,196	686,20	24,369	686,20
212,00	50,75	744,70	44,558	744,70	38,244	744,70	35,415	744,70	31,251	744,70

Annexe 25 : Jaugeage de surface, station Boujdaria.



Annexe 26 : Carte iso-pièze de la nappe de Kairouan en janvier 1977.

