

TENDANCE PLUVIOMETRIQUE ET CRISE AGRICOLE : CAS DU SAHEL CENTRAL TUNISIEN

Rainfall trend and agricultural crisis: the case of the Tunisian Central Sahel

AZAIZ Naima^{1,2,3}, ANSAR Allaoua^{4,5}

¹King Khalid University, Faculty of Human Sciences, Abha, Saudi Arabia and

²Preparatory Institute for Literary Studies and Human Sciences of Tunis I (IPELSHT),

³Laboratory Biogeography, Applied Climatology and Environmental Dynamics (BICADE), Faculty of Arts and Humanities of Manouba, Tunis.

⁴Département D'aménagement du Territoire. Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de L'aménagement du Territoire, Université Mentouri de Constantine

⁵Professeur associé aux universités de Constantine 2, Emir Abdelkader de Constantine, de Batna et Ecole normale supérieure de Constantine, Algérie.

nazaiez@kku.edu.sa / azaieznaima@yahoo.fr, anserallaoua@gmail.com

Résumé

Le Sahel Central Tunisien, réputé autrefois par sa vocation agricole, se trouve depuis les années soixante-dix concurrencé par d'autres activités, notamment l'industrie à Teboulba et le tourisme à Bekalta. Cette métamorphose a coïncidé avec l'avènement des changements climatiques qui se sont traduit essentiellement par une baisse des pluies et une hausse des températures, d'où les influences néfastes sur le bioclimat de cette contrée. En effet, la sécheresse est devenue plus importante que son opposée tant sur le plan quantitatif que qualitatif. Le déficit hydrique a prévalu avec un dysfonctionnement de l'hydrosystème occidental en amont de la sebkha de Moknine d'où une crise agricole de plus en plus manifeste et croissante.

L'explication de cette situation est très complexe. Elle est tributaire de plusieurs facteurs, qui sont à la fois endogènes et exogènes. Leur étude dans leur totalité ne sied point avec la conjoncture, ni avec la problématique de cet événement scientifique. De ce fait, nous nous sommes limités à saisir les caractéristiques pluviométriques, notamment, leur tendance, afin de montrer leur part dans cette crise agricole. Cette région, où la tendance des pluies est à la baisse, a connu, en quatre années soit entre 2019 et 2023, une réduction des terres

agricoles de l'ordre de 45 % et une augmentation de leur salinité, d'où une diminution de la production agricole.

Le traitement des données pluviométriques de la période 1953-2018, l'analyse géospatiale des images Sentinel 2 (précision 10 m), la modélisation et l'illustration graphique sont les moyens utilisés pour expliquer cette problématique qui peut, à long terme, nuire au développement de cette région jadis prospère.

Mots clés : Changements Climatiques, Image Sentinel 2, NDVI et NWDI, Crise Agricole, Sahel Central Tunisien.

Abstract

The Tunisian Central Sahel, once reputed for its agricultural vocation, has since the 1970s found itself in competition with other activities, notably industry in Teboulba and tourism in Bekalta. This transition has occurred at the same time as the coming of climate change, which has led to a decline in rainfall and an increase in temperature, thus adversely affecting the bioclimate of this region. Indeed, drought has become more important than its opposite in both quantitative and qualitative terms. The water deficit has prevailed, with a significant dysfunction of the western hydrosystem upstream of the Moknine sebkha, resulting in an increasingly obvious and growing agricultural crisis. The underlying cause of this situation is extremely complex. It depends on several factors, both endogenous and exogenous. Studying them in their entirety does not fit in with the context, nor with the problematic of this scientific event. For this reason, we have confined ourselves to rainfall characteristics, and in particular rainfall trends, to show their role in this agricultural crisis. This region, where the rainfall trend is declining, has seen a reduction in agricultural land of around 45% and an increase in its salinity over the four years between 2019 and 2023, resulting in a drop in agricultural yields. The processing of rainfall data for the period 1953-2018, the geospatial analysis of Sentinel 2 images (10 m accuracy), the modeling and the graphic illustration are the means used to explain this problem which might, in the long term, compromise the development of this once prosperous region.

Keywords: Climate change, Sentinel-2 image, NDVI and NWDI, Agricultural crisis, Tunisian Central Sahel.

ملخص

شهدت منطقة الساحل الأوسط التونسي، التي اشتهرت منذ سبعينيات القرن الماضي بصيغتها الزراعية، منافسة مع أنشطة أخرى، لا سيما الصناعة في طبلية والسياحة في البقالطة. وقد تزامن هذا التحول مع التغيرات المناخية، التي أدت بشكل أساسي إلى انخفاض في هطول الأمطار وارتفاع في معدلات الحرارة، مع كل ما يتبعهما من تداعيات سلبية على المناخ الحيوي لهذه المنطقة. وبالفعل، أصبح الجفاف أكثر انتشاراً من نقيضه، كماً ونوعاً. وقد ساد العجز المائي مع اختلال نظامه خاصة في المنابع العليا الغربية للمنظومة المائية لسبخة المكين، مما أدى إلى أزمة زراعية واضحة والتي هي في تزايد مستمر. وإن تفسير هذا الوضع هو في غاية من التعقيد. فهو يتأثر بعدة عوامل، داخلية وخارجية على حدٍ سواء. ودراساتها في مجملها لا تتناسب مع السياق، ولا مع إشكالية هذا الحدث العلمي. ولهذا السبب، فقد اقتصرنا على تحليل أنماط واتجاهات هطول الأمطار فقط، من أجل إبراز دورها في الأزمة الزراعية الحالية. حيث عرفت هذه المنطقة، التي يتجه هطولها المطري نحو الانخفاض، تراجعاً في مساحة أراضيها الزراعية بحوالي 45% وزيادة في الملوحة على مدى السنوات الأربع الأخيرة بين عامي 2019 و2023، مما أدى إلى انخفاض الإنتاج الزراعي. علماً وأن معالجة بيانات الهطول المطري من عام 1953 إلى عام 2018، والتحليل المكاني لصور القمر الاصطناعي (Sentinel 2) بدقة 10 م، والنمذجة المكانية والتمثيل البياني هي الوسائل التي تم استخدامها لتفسير وتحليل هذه المشكلة، والتي يمكن أن تهدد على المدى الطويل المجهودات التنموية المنجزة في هذه المنطقة، التي لطالما كانت مزدهرة في السابق.

كلمات مفتاحية: التغيرات المناخية، مرئيات سننتيل 2، مؤشر اختلاف الخضرة النباتي القياسي، مؤشر الفرق المعياري للمحتوى المائي، الأزمة الزراعية، الساحل التونسي الأوسط.

Introduction

Le sahel central tunisien compte, notamment la commune de Teboulba, parmi les anciens berceaux de la culture des primeurs les plus prospères du pays. Cependant, après les années 1970, cette région a connue des mutations spatiales qui ont conduit, à notre avis, à une crise agricole. En effet, la création du périmètre irrigué du Sahel Central, dont le but est de ramener un essor économique, a eu un effet inverse dû à la fois aux changements climatiques et à la concurrence des activités industrielles et touristiques, sans négliger la croissance urbaine. Les changements climatiques se sont traduits, comme par ailleurs dans le monde entier, par une baisse des pluies et une hausse des températures. Ces deux faits ont pris une place considérable aux cours de ses dernières années (Abdelkhalek, 2009 ; Azaiez, 2022). La

baisse du niveau piézométrique de la nappe phréatique et la salinisation du sol et des eaux souterraines sont le résultat de ce dérèglement climatique. Les interventions anthropiques où l'utilisation massives des pesticides, qui sont très vite entrainés dans la nappe phréatique, où la prédominance des sols sableux très perméables favorisent le lessivage rapide des pesticides et des engrais. L'urbanisation accélérée, accompagnée par l'émergence d'une multitude d'activités touristiques, industrielles et autres, au détriment de l'espace agricole, a été à l'origine de la destruction de tous les efforts de consolidation et des acquis de la commune de Tébourba et ses environs (Ben Attia et al, 2017). Les études antérieures ont mis l'accent sur les mutations qui sont intervenues à la suite de l'incorporation des activités touristiques et industrielles (Ben Attia, 2016) tout en soulignant l'absence des normes adéquates qui garantissent un usage rationnel du foncier urbain. La salinisation est accentuée par une forte évapotranspiration, mais aussi par l'intrusion des eaux salées, venant de la mer et de la sebkha, lors de la baisse de niveau piézométrique (Souguir, et al, 2019).

- Quel rôle jouent les variations pluviométriques dans l'intensification de la crise agricole ?

-Quelles cultures sont les plus affectées ?

-Quel est l'apport de la télédétection dans le suivi et la gestion de la crise agricole liée aux conditions climato-édaphiques ?

Cette étude cherche à comprendre les mécanismes climatiques, édaphiques et humaines affectant le système agricole, étudier leurs tendances et explorer les pratiques d'adaptation locales et les mesures d'adaptation innovantes dans le Sahel Central Tunisien.

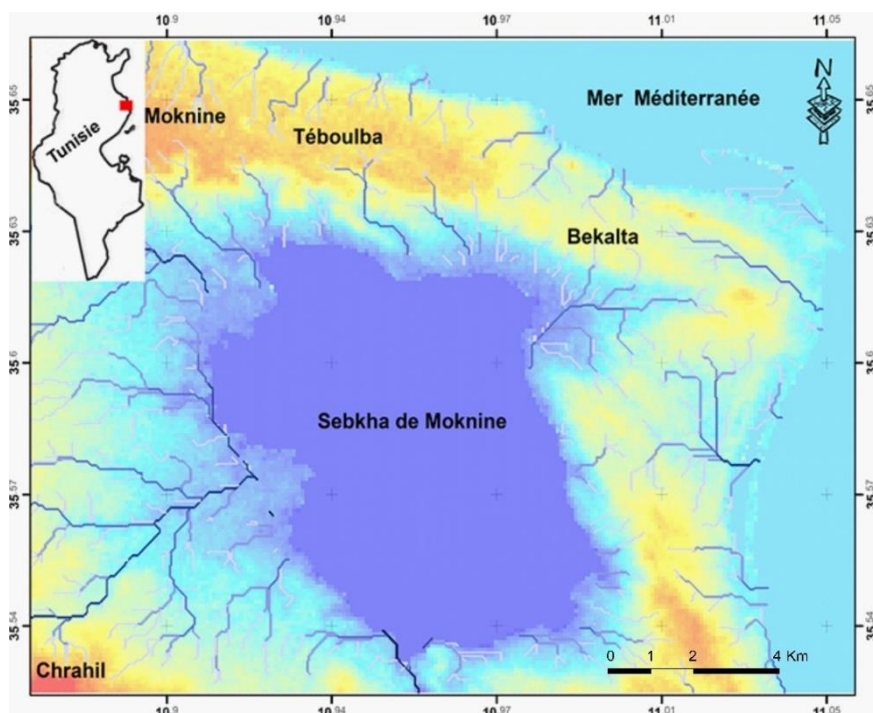
Nous constatons une « alliance » négative entre les facteurs anthropiques et naturels, nous allons essayer, en premier lieu, de nous pencher sur les caractéristiques pluviométriques relatives à cette région, en utilisant les données pluviométriques de la station de Tebourba pour la période 1953-2018. En second lieu, nous allons tenter de saisir l'impact de cette pluviosité en analysant les images satellitaires Sentinel 2 des années 2019/2020 et 2022/2023 mais aussi en exploitant les résultats de l'enquête faite auprès des

agriculteurs qui retrace l'évolution de la salinité, mais surtout de suivre la production agricole.

1. Zone d'étude

La commune de Té Boulba se situe dans la partie centrale du sahel tunisien. Elle se trouve coincée entre deux plans d'eau salés ; la mer Méditerranée de l'est et la sebkha de Moknine de l'ouest et de sud-ouest (Fig. 1).

Figure1 : Localisation de la Zone d'étude



Source : traitement de l'image SRTM (précision 30m), 2014

La sebkha est séparée de la mer Méditerranée par une barrière rocheuse formée soit d'une croûte quaternaire ou du grès du Tyrrhénien, dont l'altitude maximale n'excède pas le 48 m (formation Rjiche) (Chairi. R. 2004). De point de vue structurale, la Sebkha de Moknine s'est évoluée en cuvette de subsidence en forme d'un graben d'âge Aptien-Oligocène (Kammoun, 1981 ; Bedir, 1988). Elle est tranchée du plateau de Moknine par une faille probable de direction ouest-sud-ouest / est-sud-est.

De point de vue topographique, elle montre des altitudes modestes d'où un paysage plat et monotone, parfois découpé en collines, avec un léger basculement vers l'est. Les sols propres à cette région sont en grande partie sableux à l'est de la sebkha et sablo-argileux du côté ouest, avec un taux d'encroûtement relativement important. Les bordures de la Sebkha sont formées des sols halomorphes argileux et argilo-silteux et sont dotés d'une faible porosité (Carte agricole du gouvernorat de Monastir, 2003 ; Azaiez ; 2022). Ces propriétés physiques du sol favorisent un ruissellement plus manifeste sur la rive occidentale et des fortes infiltrations sur la rive orientale. Ces faits sont, en partie, associés à une pluviométrie relativement importante générée par les influences maritimes contrôlées fréquemment par des gouttes d'air froid et des flux de retour d'est (Abdelkhalek, 2009 ; Azaiez, 2022).

En effet, la première appréciation sur la pertinence des conditions climato-édaphiques de la zone d'étude, montre bien que la région est assujettie à des pertes dans ses ressources en eau par ruissellement à l'ouest de la Sebkha, par infiltration de son côté est, par évaporation directe, et par dégradation qualitative à cause de la salinisation et de la pollution entraînée par l'utilisation massive des engrais dans le cadre de la culture intensive (Khaskhoussy et Hachicha, 2020).

2. Méthode et outils

Nous avons choisi une méthode mixte faisant intervenir à la fois l'analyse statistique, l'apport de SIG et de la télédétection et les enquêtes par interview faites auprès de 30 agriculteurs de la région.

Le traitement statistique détaillée a été réservée à l'analyse des pluies enregistrées entre 1953 et 2018 dans la station de Té Boulba, ce qui permettra de déterminer leur tendance, les périodes pluvieuses et non pluvieuses, et, du coup, d'estimer leur aptitude dans la constitution des réserves hydriques dans le sol et les possibilités d'alimentation naturelle de l'aquifère de Té Boulba et ses environs.

L'analyse des images satellitaires en utilisant le programme Google Earth Engine capable de faire le maillage et la superposition des images multi-dates ayant moins de 5 % de nébulosité afin d'éviter toutes interférences nuisibles à l'interprétation. L'utilisation de ce

programme garantit une bonne précision des résultats de classification des indices climato-édaphiques.

Le calcul de l'indice NDVI (Normalized Difference Végétative Index) et l'indice NWDI (Normalized Difference Water Index) donnent un état de lieu respectivement sur l'état de la végétation, l'extension des cultures et l'évolution de la réserve hydrique dans le sol. Ces deux indices témoignent de la présence d'un contexte climatique très peu favorable pour subvenir aux besoins hydriques de la culture irriguée qui consiste dans la salinisation accélérée des eaux souterraines.

Les enquêtes faites auprès de 30 agriculteurs de la région font ressortir une nette dégradation de la production des différentes essences. Elle est évaluée, selon eux aux environs de 50 % des revenus de l'année 2019/2020. Elle est estimée à 65 % par les services compétents (Département de la production agricole, 2023). Cette production est tributaire des conditions hydriques. En certaines années, elle enregistre des quantités records. Ce fût le cas en 2019/20 où la production de la pomme de terre précoce a noté une hausse de 45 %. Durant la même année, l'huile d'olive a atteint 19 600 tonnes à l'inverse des années 2021/22 où la production n'était que de 4 000 tonnes.

3. Résultats préliminaires et discussion

Le Sahel tunisien est caractérisé par un climat semi-aride méditerranéen marqué par une forte saisonnalité. Il se situe à la croisée des influences méditerranéennes et sahariennes, ce qui lui confère un caractère semi-aride distinct et très vulnérable aux aléas climatiques.

3-1. Des pluies où la tendance est à la baisse

Le traitement statistique des hauteurs pluviométriques enregistrés à Teboulba durant la période 1953-2018, soit 66 ans, montre que la moyenne est de 370.5 mm. Elle oscille entre 807.1 mm enregistré en 1969-70 et 78.5 mm notée en 2012-13 et 2021-22.

La localisation temporelle de ces données révèle deux caractéristiques pluviométriques qui peuvent-être à l'origine de cette crise agricole :

Une variabilité interannuelle très importante confirmée par le rapport entre les quantités extrêmes et qui est égal à 10.28 fois.

Une tendance pluviométrique à la baisse.

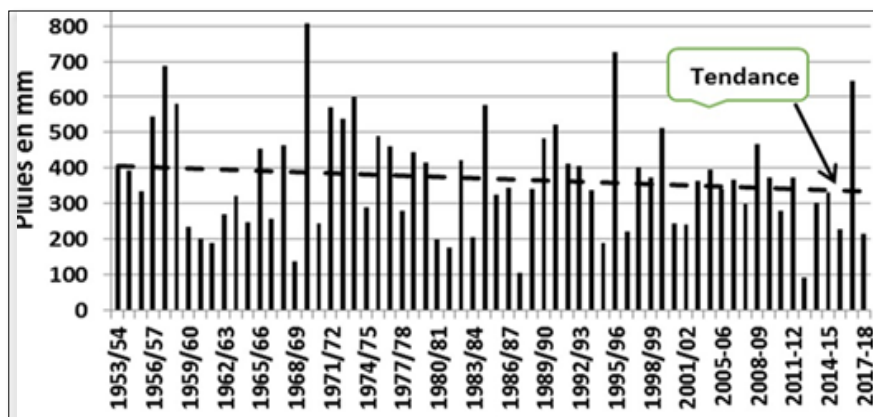
Les totaux pluviométriques enregistrés à Teboulba s'organisent en trois grands cycles :

- Le premier commence en 1953-1954 et s'achève en 1968-1969. Il se caractérise par des totaux pluviométriques annuels qui varient entre 190,9 mm et 688 mm enregistré en 1957-1958. Ce cycle est subdivisé en plusieurs microcycles. Il commence par des totaux inférieurs à 400 mm qui caractérisent les trois premières années, pour ensuite prendre de l'ampleur en enregistrant des quantités qui dépassent 600 mm. A partir de 1959-1960, les totaux annuels diminuent remarquablement à moins de 200 mm pour augmenter sensiblement, en enregistrant plus de 300 mm en 1963-1964. Ensuite, les totaux annuels s'organisent en dents de scie. Ils sont tantôt supérieurs à 500 mm (1965-1966 et 1967-1968), tantôt inférieurs à 200 mm comme c'est le cas en 1968-1969 où l'on note 135 mm seulement.

- Le second débute en 1969-70 et se termine en 1994-95, soit 27 années (le plus long). Il débute en force en enregistrant 807.1 mm en 1969-70. Après une année, 1970-1971, qui n'enregistre que 244,7 mm, les totaux pluviométriques annuels sont, généralement, au-dessus de 400 mm, à l'exception de deux années, 1980-1981 et 1981-1982, qui sont en-dessous de 200 mm, avec des microcycles intermédiaires.

- Le troisième cycle couvre la période allant de 1995-1996 à 2017-2018 soit 22 années. Il se manifeste par des totaux relativement faibles. En effet, à l'exception de deux années, 1995-1996 avec 726.1 mm et 2016-2017 avec 645,51 mm, les quantités pluviométriques sont en-dessous de 50 mm. Cette vérité est confirmée à la fois par l'allure générale de la répartition temporelle de ces quantités et par la droite de tendance décroissante (Fig. 2).

Figure 2 : Répartition des quantités pluviométriques annuelles pendant la période 1953-1954/2017-2018



Source : Direction Générale des Ressources en Eau, 1953-2018

L'utilisation de la méthode des rapports montre que les pluies annuelles à Tébourba sont dominées par le caractère pluvieux (45.3 %), mi pluvieux (37.5%) et peu pluvieux de (15.6%). Autrement, la balance relative à la station de Tébourba située à 4 km de la mer, est relativement, équilibrée avec une légère tendance à la non-pluviosité (Tableau. 1). Cependant, en prenant en considération la réalité climatique, thermique en particulier, de cette région qui connaît, à l'instar de toute la Tunisie, une hausse thermique qui influe négativement sur ces ressources hydriques.

Cet équilibre s'exprime par le nombre de cycles pluviométriques. Nous constatons la prédominance des années peu favorables à la constitution des ressources en eau (PFCRE) avec 53.1 % et celles qui sont favorables à cette aptitude (FCRE) avec 45.3%. Ces deux tendances alternées s'organisent en cycles et en années isolées.

Nous avons compté sept cycles pour les années favorables à la constitution des ressources en eau (FCRE) et autant pour les années peu favorables à la constitution des ressources en eau (PFCRE). Ce qui atteste ce léger équilibre déjà évoqué et qui est confirmé par le nombre d'années isolées ; neuf pour les FCRE et dix pour les PFCRE (Tableau. 1).

Tableau 1 : Aptitude de constitution des réserves en eau dans l'aquifère de la commune de Téboulba et ses environs

Années	X	R		Années	X	R		Années	X	R		Années	X	R
1953/54	+	+		1969/70	+	+		1985/86	-	-		2001/02	-	-
1954/55	+	+		1970/71	-	-		1986/87	-	-		2002/03	-	-
1955/56	-	-		1971/72	+	+		1987/88	-	-		2004/05	+	+
1956/57	+	+		1972/73	+	+		1988/89	-	-		2005/06	-	-
1957/58	+	+		1973/74	+	+		1989/90	+	+		2006/07	-	-
1958/59	+	+		1974/75	-	-		1990/91	+	+		2007/08	-	-
1959/60	-	-		1975/76	+	+		1991/92	+	+		2008/09	+	+
1960/61	-	--		1976/77	+	+		1992/93	+	+		2009/10	+	+
1961/62	-	--		1977/78	-	-		1993/94	-	-		2010/11	-	-
1962/63	-	-		1978/79	+	+		1994/95	-	--		2011/12	+	+
1963/64	-	-		1979/80	+	+		1995/96	+	+		2012/13	-	--
1964/65	-	-		1980/81	-	-		1996/97	-	-		2013/14	-	-
1965/66	+	+		1981/82	-	-		1997/98	+	+		2014/15	-	-
1966/67	-	-		1982/83	+	+		1998/99	+	+		2015/16	-	-
1967/68	+	+		1983/84	-	-		1999/00	+	+		2016/17	+	+

1968/69	-	--		1984/85	+	+		2000/01	-	-		2017/18	-	--
---------	---	----	--	---------	---	---	--	---------	---	---	--	---------	---	----

X : signifie la tendance pluviométrique vers la hausse ou vers la baisse

R : signifie la réserve hydrique

Source : Résultats de traitement des données pluviométriques issues de la Direction Générale des Ressources en Eau, 1953-2018.

3-2. Réserve hydrique dans le sol et état du tapis végétal

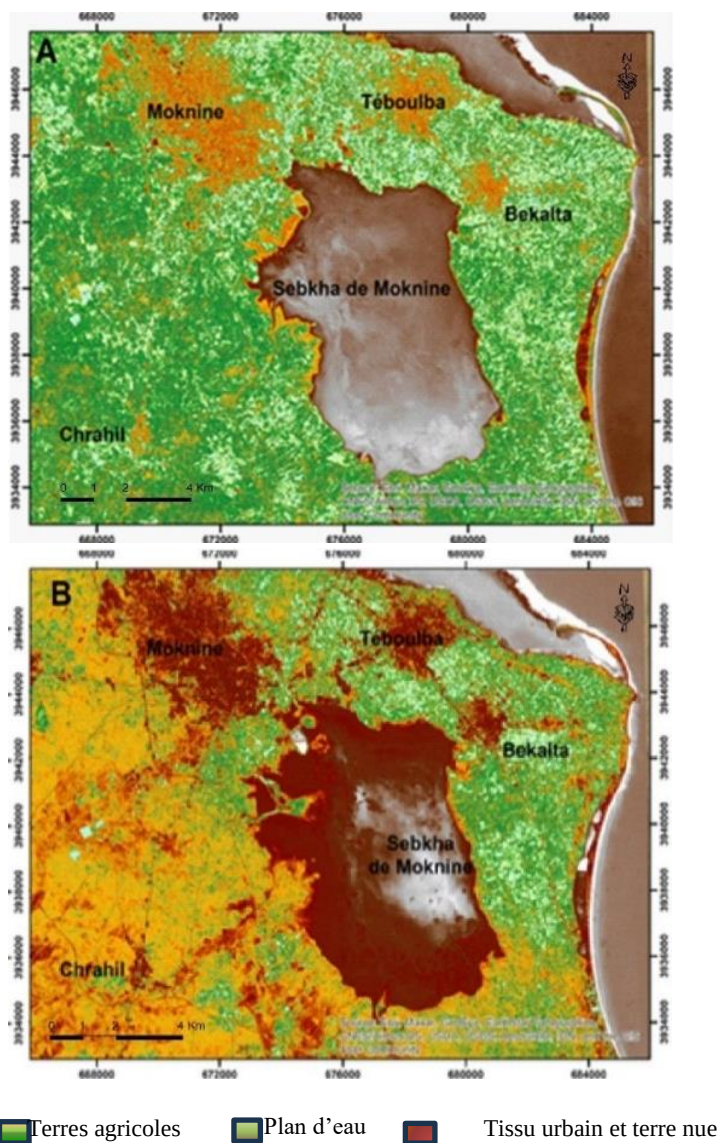
Pour connaître les réserves hydriques enfouies dans le sol, la nature du tapis végétal, la salinité etc, nous avons eu recours à deux indices : le premier est le NDVI (Normalized Difference Vegetative Index) et le second NWDI (Normalized Difference Water Index). En effet, ces différents facteurs reflètent l'activité agricole et l'état sanitaire de la végétation naturelle.

Ils sont étroitement liés aux aspects quantitatifs, qualitatifs et de la répartition spatiale des pluies. Le traitement statistique ci-dessus fait ressortir que les années 2019 et 2020 sont exceptionnellement pluvieuses et donc favorable à la constitution des réserves hydriques dans le sol.

Cette situation a permis une recharge consistante de la nappe phréatique de la région et une légère baisse de la salinité des eaux et par conséquent l'épanouissement du couvert végétal et de l'agriculture en termes de surface et de variété des produits agricoles (Fig 3 et 4).

L'indice de NWDI a varié de 0.815 à -0.00 pour la même période. Une comparaison de l'indice de l'humidité moyenne du sol des quatre dernières années a fait ressortir un sol gorgé en eau entre l'automne de 2019 et l'année 2020.

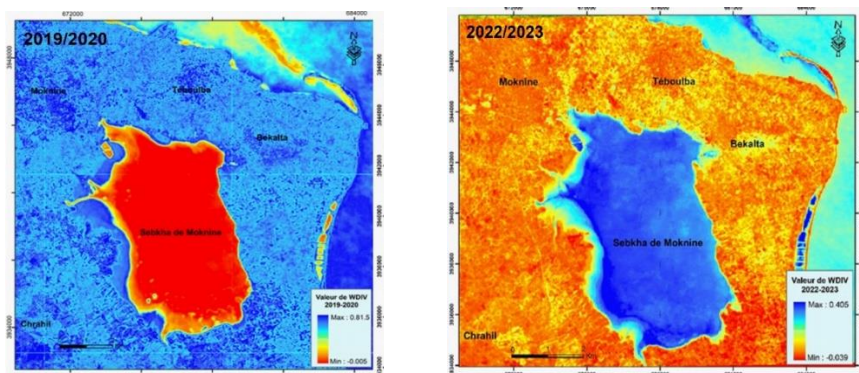
Figure 3 - 4 : Terres cultivées en années pluvieuses (A : 2019/2020) et en années non pluvieuse (B : 2022/ et les 9 premiers mois de l'année 2023)



Source : Mosaïquage des Images Sentinel-2 de 2019/2020 (A) et 2022 et les 9 premiers mois de l'année 2023 (B) sous le programme Google Earth Engine.

Au contraire, un déficit hydrique qui s'est installé après une brève période d'humidité avec un indice de NWDI qui a varié de 0.404 à -0.0039 entre 2022 et septembre 2023. La quasi-totalité des terres sont cultivées en 2019/2020. Contrairement à l'année 2022 et les neuf premiers mois de l'année 2023 sont considérés comme non pluvieux et par conséquent peu favorables à la constitution des réserves en eau (Fig 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8).

Figure 5-6 : Estimation de la réserve hydrique dans le sol en années pluvieuses (2019-2020) et non pluvieuses (2022-2023)



Source : Géotraitement des images mosaïquées de Sentinel 2 pour la période 2019/2020 (Précision de l'image est de 10 m)

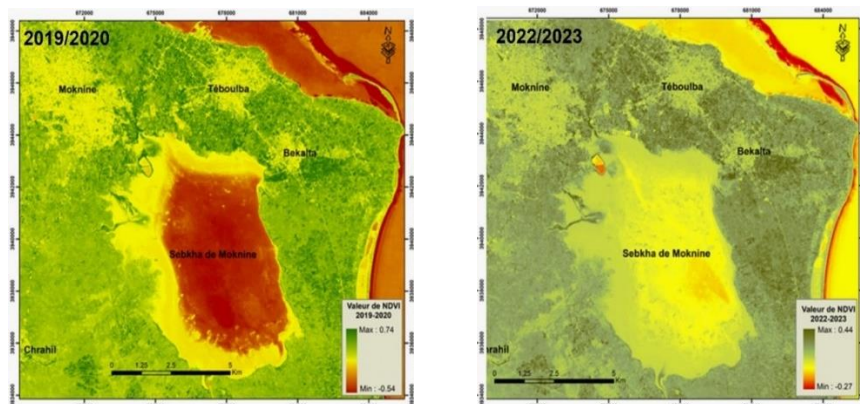
En effet, la persistance de l'eau et sa rétention dans le sol sont, généralement, influencées par la texture du sol. A l'est de la Sebkha de Moknine prédominent des sols sableux très perméables et favorisent une remontée capillaire très fréquente.

Ce phénomène de capillarité se manifeste par la formation d'une croûte superficielle constituée par la superposition de lamelles très fines de calcaire connaissant une migration verticale sous l'effet de la forte évaporation (Ruellan, 1969). Ce fait, gêne beaucoup le travail du sol, mais aussi entrave la poussée de jeunes plantules et ne permet qu'un enracinement de plus en plus superficiel.

A l'ouest de la Sebkha de Moknine, les sols sont plutôt argileux et argilo-limoneux très peu perméables, ce qui augmente la capacité de rétention de l'eau, mais une infiltration sensiblement amoindrie (Azaiez et al., 2022). L'indice de NDVI a considérablement diminué de

0.72 (entre 2019 et 2020) à 0.48 (entre 2022 et 2023), ce qui reflète un rétrécissement des surfaces cultivées d'une part et l'accentuation du stress hydrique dans le domaine oléicole qui se manifestent par une réduction en teneurs en chlorophylle, notamment dans l'arrière-pays de la zone d'étude (Figs 5, 6, 7 et 8). En effet, la sécheresse n'est pas un phénomène isolé de l'histoire climatique de la Tunisie, mais son effet devient de plus en plus accentué, résultat de la juxtaposition des cycles secs. Toutefois, il faut signaler que le taux d'humidité dans le sol est d'autant plus important à l'ouest de la Sebkha, aux environs de Chrahil-Moknine que de son côté est. Ce fait, est étroitement lié à la texture du sol assez différenciée, mais aussi grâce à la densité du réseau hydrographique et la dimension des bassins versants (le bassin versant de l'oued El Maasra comme exemple) (Azaiez et al., 2024).

Figure 7 - 8 : Indice de NDVI en années pluvieuses (2019-2020) et non pluvieuses (2022-2023)



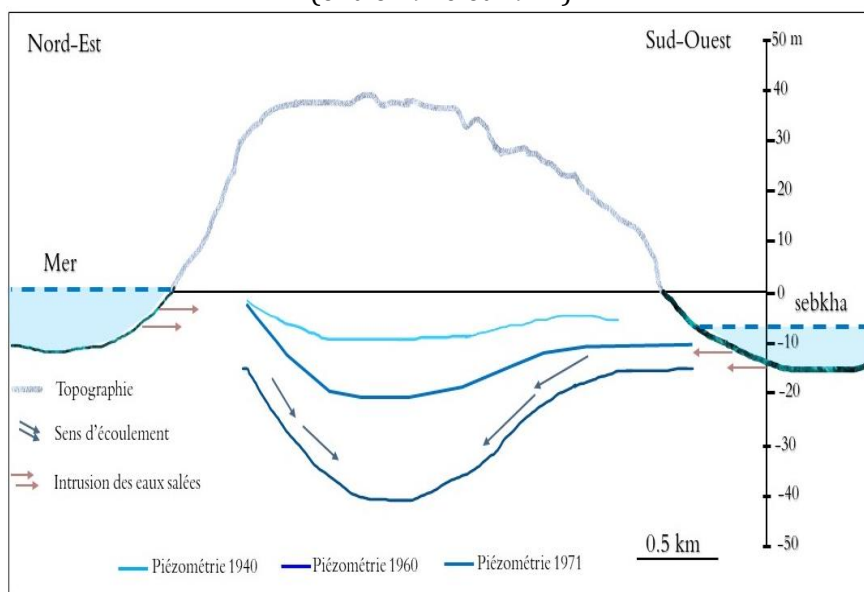
Source : Géotraitement des images Sentinel 2, des années pluvieuses et non pluvieuses (Précision 10 m)

Selon les paysans enquêtés, la production de pomme de terre précoce a augmenté de 45 % par rapport à la normale entre 2019 et 2020. Une production record de l'huile d'olive a été enregistrée avec une quantité de 19600 Tonnes entre 2019 et 2020 face à 9600,5 Tonnes et 4000 Tonnes, respectivement en 2021 et 2022. La baisse par rapport à la normale était de 65% (Département de la production agricole, 2023). Les variations des conditions hydriques dans le sol, sous l'effet des changements climatiques et de la modification du régime

pluviométriques, ont un effet direct sur l'état du couvert végétal naturel et sur la production agricole.

Cette menace se traduit par une variation notable de l'indice de NDVI entre 2019 et 2020 et la période 2022/2023. Parmi les conséquences de la réduction du potentiel hydrique, c'est l'augmentation de la salinité qui a affecté le sol, aussi bien que les eaux de la nappe phréatique, probablement influencées par l'intrusion des eaux salées (du côté de la sebkha de Moknine à l'Ouest et de la mer à l'Est) (Fig. 9).

Figure 9 : Evolution du niveau piézométrique de la nappe phréatique de Té Boulba située entre deux plans d'eau salés (entre 1940 et 1971)



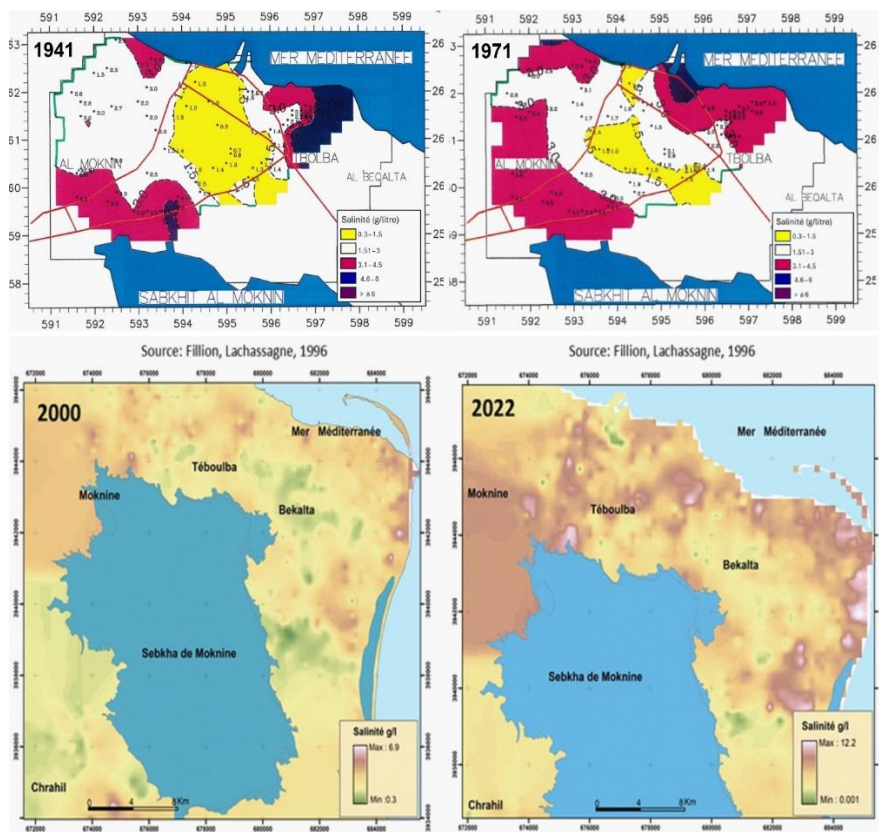
Source : CRDA de Monastir, 2007, avec modification.

Une étude précédente qui a porté sur la modélisation de la salinité de la nappe phréatique de Té Boulba entre 1941 et 1996, revêt un caractère particulièrement sensible à la salinisation (Fillion et Lachassagne, 1996).

Cette situation devient de plus en plus prioritaire pendant ces dernières années au fur et à mesure de l'élargissement du cône de dépression suite de l'appel au vide qui a accompagné la

surexploitation et l'épuisement de la nappe (Fig. 10, 1941, 1971, 2000 et 2022).

Figure 10 : Variation de la salinité de la nappe phréatique entre 1941 et 2022



Source : Géotraitement des images Sentinel 2, 2019, 2020, 2022 et 2023 (10 m)

Des études ultérieures ont mis l'accent sur les solutions possibles pour maintenir le niveau piézométrique de la nappe et réduire les résidus secs dans les eaux souterraines (Khaskhoussy et Hachicha, 2020).

En se basant sur des campagnes de terrain, des analyses et des modélisations, certaines études ont trouvé une étroite relation entre la fréquence de l'alimentation artificielle de l'aquifère d'une part et l'élévation du niveau piézométrique et la baisse de la salinité de l'autre

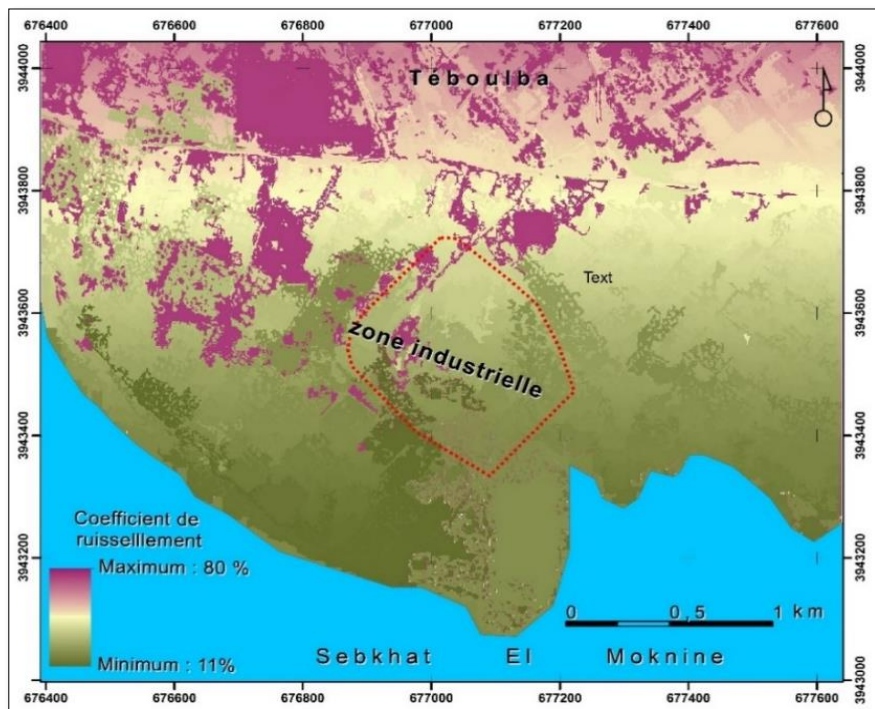
(Filion et al, 1996, Lebben, et Khanfir, 2007 ; Ferchichi, 2007). La recharge artificielle de la nappe s'est effectuée à travers 6 puits vers le début des années 1980 et 11 puits lors la décennie suivante et 17 puits à partir du siècle en cours (21eme siècle).

Cependant, un paradoxe demeure. Comment expliquer la diminution des ressources en eaux, pourtant la surface des terres agricoles s'est rétrécie comparé à la période 1970/2000, malgré l'adoption de système de diguette amélioré, ou l'irrigation goutte à goutte de la part des agriculteurs, surtout que la baisse des pluies n'est pas, en soi, une preuve de tarissement des eaux et de leur détérioration qualitative ?

Tous ces faits relèvent que l'agriculture aujourd'hui n'est pas le seul secteur qui consomme le plus d'eau. Au contraire l'usage domestique et industriel à Té Boulba et, surtout, le secteur touristique à Bekalta représentaient une part également importante dans la consommation totale. Une multiplication de forages dans les maisons et les parcelles agricoles pendant la dernière décennie confirme cette remarque.

Autre fait à souligner, c'est la réduction du coefficient d'infiltration estimé de 5% seulement, en 1979. Cette diminution est liée d'abord à la prédominance d'une épaisse croûte calcaire, mais aussi s'est liée à l'étalement urbain récent et à la prolifération du coefficient de ruissellement qui est de l'ordre de 46 % en moyenne mais il peut attendre 80% par endroit (Fig. 11). Sachant que la commune de Té Boulba a enregistré une densité de population parmi les plus fortes du gouvernorat de Monastir, soit 1735 habitants/km² en 2022. L'étalement urbain s'est opéré aux dépens des gouffres, des grottes et des avens endo karstiques reliés à des drains verticaux et des cavités qui forment un système hydrogéologique compliqué. Il est fort probable que ces unités endo karstiques ont joué un rôle déterminant dans la mobilité des eaux souterraines et l'alimentation de la nappe phréatique.

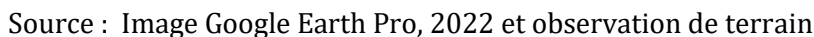
Figure 11 : Répartition du coefficient de ruissellement dans les confins sud de la commune de Té Boulba



Source : Résultats de traitement réalisé sous Arc Gis en se basant sur les données obtenues de l'image SRTM et l'image Sentinel 2, 2022.

Aujourd'hui, ce fonctionnement est largement affecté sous l'effet de la pression anthropique avec l'étalement urbain qui a causé un masquage de la majorité de ces cavités karstiques et par conséquent une diminution de la part des eaux infiltrés (Fig. 3)

Il faut toutefois contrôler l'extension de tissu résidentiel en fonction des traits topographiques, géologiques et des réseaux endo karstiques de la commune, parce que l'occupation actuelle du sol s'est effectuée au détriment de la pérennité des ressources en eau souterraine. D'une autre part les polluants (eaux usées et engrais) entraînés dans l'aquifère peuvent avoir leur source dans les puits perdus qui demeure le mode d'évacuation hygiéniques le plus utilisés dans les quartiers limitrophes de périmètres irrigués situés au sud du chemin de fer à Té Boulba (Fig. 12).

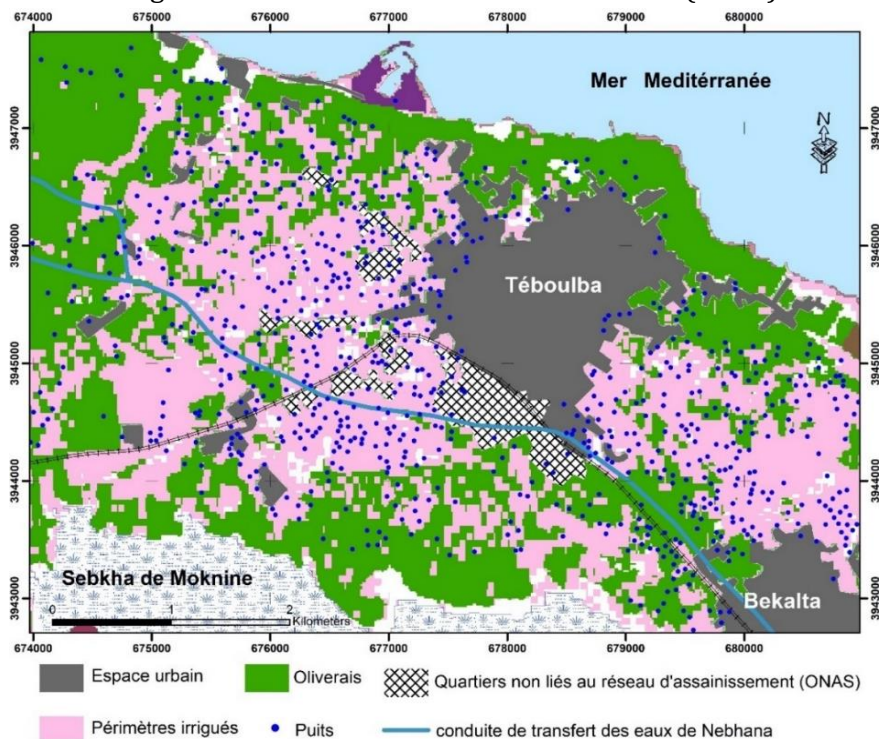


48

le cassures occasionnelles) pourrait être parmi les facteurs à prendre en considération dans la pollution de l'aquifère et l'augmentation du taux des résidus secs dans les eaux souterraines.

En se focalisant seulement sur le fait de la salinité, c'est la position de charnière entre deux plans d'eau salés et la tendance des pluies vers la baisse, sont les facteurs qui expliquent les faits d'échanges médiocres des eaux salées avec la mer et la sebkha. Pour les autres causes soulevées, il faut les vérifier sur le terrain à travers des outils de surveillance les plus avancés à l'instar de la méthode basée sur la tomographie de résistivité électrique, cela permettra d'adopter les moyens de lutte les plus adéquates à la région.

Figure 13 : Extension de tissu résidentiel aux dépens de périmètre irrigués et non lié au réseau d'assainissement (ONAS)



Source : Les données de la carte agricole du gouvernorat de Monastir et les résultats du suivi de terrain et de la classification supervisée de l'image Sentinel 2 de 2022

Conclusion

Dans cette étude, nous avons essayé de mettre en évidence l'impact des changements climatiques et plus précisément la tendance des pluies et leur influence sur le secteur agricole au Sahel Central. En effet, le rétrécissement des surfaces cultivées et la baisse de la production agricole s'expliquent, en grande partie, par la baisse des pluies, la hausse de la salinité et la détérioration des sols, mais aussi par des mutations spatiales que connaît cette région depuis plus d'un demi-siècle.

L'urbanisation accélérée et l'introduction des activités industrielles et touristiques ont fait priver la région d'une partie de sa vocation agricole. Té Boulba est passée d'un espace producteur et alimentant une grande partie de la Tunisie en produits agricoles à une région qui est au seuil de l'autosuffisance. Nous pensons que cette situation s'applique à tout le Sahel Central mais faute de disponibilité de données propres à chaque région, nous restons moins affirmatifs.

Toutefois, nous espérons que cette étude pourrait constituer un prélude pour des recherches sectorielles plus détaillées. Notre souci est que les autorités locales, dont le rôle est primordial, doivent orienter leurs actions vers une intervention rationnelle pour mieux gérer les ressources en eau et valoriser le potentiel hydrologique propre à cette région. Un plan d'aménagement intégré qui n'exclue aucune activité nuisible aux équilibres naturels de cette région en respectant le seuil de tolérance environnementale de celle-ci. Une condition qui peut rendre à Teboulba et ses environs leur euphorie de jadis.

Bibliographie

ABDELKHALEK, A., 2009, Les intensités des pluies dans la Tunisie orientale, Thèse de Doctorat en Climatologie, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 310 p.

AMRI, R, 1994., Recharge artificielle de la nappe de Té Boulba. Microfiche, ONAGRI, ministère de l'Agriculture de la Tunisie, Tunis, Octobre 1994, 13 p.

AZAIEZ, N., 2024 (a), Combined use of caesium-137 isotope and the universal soil loss equation to establish a soil loss budget along hill slopes in *El Maasra basin*. *Soil Environ.* 43(1), 127-147.

AZAIEZ, N., 2024 (b), The contribution of remote sensing in highlighting the resilience of rangelands through indicators of land surface temperature and the normalized difference vegetation index in *the Tihama alluvial plain*, *Geographia Technica*, Vol. 19, Issue 2, 2024, pp 139 - 151.

AZAIEZ, N., Zoghlami, K., Qhtani, N., 2022, The Role of Clay Quarries in Moderating the Effects of the Floods of 20 September 2020 in *the City of BNI Hassen (Sayala basin)*, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology* 7(5), pp 1336-1349

BEDIR, M., 1988, Géodynamique des bassins sédimentaires du Sahel de Mahdia (Tunisie orientale) de l'Aptien à l'Actuel. Sismo-stratigraphie, sismotectonique et structurale. Thèse de troisième Cycle. Université de Tunis II. Faculté des Sciences de Tunis, 235 p

BEN ATTIA, O., 2016, Interactions entre l'évolution de l'agriculture littorale tunisienne et le développement de l'urbanisation et du tourisme : le cas des régions périurbaines au Nord Est de Sousse et au Sud de Monastir. Thèse de doctorat (PTP), ISA-CM. pp. 305.

CHAIRI, R., 2004, Etude du remplissage sédimentaire récent et de la matière organique associée dans la sebkha de Moknine. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Université de Tunis. 260 p.

DEPARTEMENT DE LA PRODUCTION AGRICOLE., 2023, Statistiques du gouvernorat de Monastir, 2023.

FERCHICHI, H., 2007, Évaluation des impacts de la recharge évaluation des impacts de la recharge artificielle et caractérisation géochimique des eaux de la nappe de Tébolba (Tunisie orientale), Mémoire de master, faculté des sciences de Tunis, 125 p.

FILLION, E, DAVID, A, LACHASSAGNE, P, 1996, Modélisation de la nappe de Tébolba (Tunisie). Simulation des phases de recharge artificielle, étude des intrusions salines depuis la Sebka et la mer Rapport BRGM R 39069 DR/HGT 96p.

KAMMOUN, Y., 1981, Etude néotectonique dans la région de Monastir Mahdia (Tunisie orientale). Thèse de Doctorat de 3ème cycle, FST, 175 p.

KHASKHOUSY, K, HACHICHA, M., 2020, Hydrogeochemical assessment of groundwater quality in *greenhouse intensive agricultural areas in coastal zone of Tunisia: Case of Teboulba region, Groundwater for Sustainable Development*, Volume 10, 2020, 100335, ISSN 2352-801X, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100335>.

LEBBEN, H., KHANFIR, R., 2007, *Historique de la recharge artificielle de l'aquifère côtier de Té Boulba (Monastir) Impact quantitatif et qualitatif*. DGRE – Tunis, Juillet 2007, 14p.

RUELLAN, A., 1969, Les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols du Maroc, O.R.S.T.O.M, n° 16035, pp 501-511.

SOUGUIR, D., HÖRMANN, G., HACHICHA, M., 2019, Évaluation de la qualité des eaux de la nappe de Té Boulba : risque de contamination des sols agricoles. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 32(2), 195–204. <https://doi.org/10.7202/1065207ar>.

TAGINA, S., BEN DHIA, H., 1999, Modélisation de l'impact de la création d'un lac artificiel sur la qualité des eaux souterraines (cas de la dépression de Moknine - Tunisie), *La Houille Blanche* n° 7/8, pp 114-123.

ZEBIDI, H., EL BATTI, D., 1981, Recharge artificielle de la nappe de Té Boulba. DRE - Tunis, 1981 – 9 p, 5 fig.