

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



N° Réf :

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf-Mila

Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et de l'Environnement

Mémoire préparé en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Protection des Écosystèmes

Thème :

Variabilité climatique et changement spatiotemporel de la sécheresse et la couverture végétale par la télédétection dans la wilaya de Mila

Présenté par :

- CHEKIROU Khedidja
- BENARAB Louazna

Devant le jury :

Président :	Tabet Slimane	MAA	Centre universitaire de Mila.
Examineur :	Laala Ahmed	MCA	Centre universitaire de Mila.
Promotrice :	Bensakhri Zinette	MCA	Centre universitaire de Mila.

Année Universitaire : 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tous nous tenons à remercier « Allah » tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté et de nous avoir bénie jusqu'à la réalisation de ce travail...

Alhamdulillah

*Nous adressons nos sincères remerciements aux membres du jury : **Dr. Tabet Slimane** Président et **Dr. Laala Ahmed** examinateur Pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos recherches en acceptant d'examiner notre travail et de les enrichir de leurs suggestions.*

*Nous tenons également à exprimer notre profond de gratitude et nos sincères remerciements à notre promotrice de ce travail, **Dr. Bensakhri Zinette** pour son assistance, pour son aide précieuse et par ses judicieux conseils pour assurer le succès de ce travail.*

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace

AVEC L'AIDE ET LA PROTECTION D'ALLAH

Cher père : Mon modèle éternel, toujours présent dans mon cœur,
Allah Que Dieu te fasse miséricorde et fasse de ton séjour le paradis.

Chère mère : Tu es la source de la tendresse, tu as travaillé, élevé et veillé. Tu es ma mère et mon père à la fois, tu es la compensation pour tout, tu es tout ce qui est beau dans ma vie. Que Dieu te préserve pour moi toute ma vie, en bonne santé, Inchallah.

Ma encadrant Madame Bensakhri Zinette ; Sur son travail, ses conseils et ses orientations constants pour moi. Que Dieu te protège, te garde et préserve ta santé et ton bien-être, Inchallah.

Mes chers frères : Omar, Zakaria, Yahya, Ayoub, Ayssa.

Mes chères sœurs : Nadjat, Amina, Soumia, Fatima.

Mes sœurs que ma mère n'a pas mises au monde : Roma et Kami.

Les maris de mes sœurs : Naim, Saber, Omar.

Mon cher ami Akram.

À tous les autres que je n'ai pas cités mais à qui je pense aussi.

Merci à tous de m'aider à devenir meilleur.

MERCI

KHEDIDJA



Dédicace

Avec l'aide et la protection d'ALLAH Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à

Mes parents :

Chère mère : À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils,

Cher père : mon exemple éternel, qui peut être fière et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte ses fruits ; Merci papa pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Que dieu leur procure une bonne santé et longue vie.

Ma encadrant Madame Bensakhri Zinette pour son aide et ses précieuses conseils et orientations.

Mes chers frères Houssam et Tarek,

Mes chers sœurs Asma et Sara

Ma tante qui m'a aidé plusieurs fois salma

et ma meilleure amie youssra kanza ilham et ma binôme Khedidja pour le courage Et la motivation

©Je vous dis merci

LOUAZNA

Résumé

La sécheresse est l'une des principales causes naturelles de la dégradation du couvert agricole et par conséquent du système économiques. Les épisodes de sécheresse apparaissent après une période sans précipitations, mais il est difficile de déterminer leur apparition, leur étendue et leur fin. Ainsi, il est très difficile de quantifier objectivement leurs caractéristiques en termes de l'intensité, de durée et d'étendue spatiale.

Dans cette étude, nous avons utilisé des techniques modernes de télédétection pour connaître l'état de sécheresse et de la couverture végétale dans la région de Mila. Nous avons utilisé deux indices ; le PDSI et le NDVI, Nos résultats indiquent une augmentation significative du NDVI au fil des années ; qui sont les plus appropriés dans ce domaine. L'étude est appliquée à la wilaya de Mila (Algérie). Les résultats obtenus montrent que la région de Mila a subi ; au cours des deux dernières décennies ; des fluctuations importantes des conditions climatiques tel que la température et la précipitation ; qui ont des impacts significatifs sur les écosystèmes, les ressources en eau et les activités humaines en générale. Également, ces résultats confirment que la zone d'étude est en état de forte vulnérabilité à la sécheresse, en particulier dans les sous-zones situées au Sud et le Sud-Est de la région.

Mots clés : Sécheresse, couverture végétale, indice PDSI et NDVI, Mila (Algérie), télédétection.

الملخص

الجفاف هو أحد أسباب تدهور الغطاء الزراعي الطبيعية الرئيسية وبالتالي نظام الاقتصاد. تظهر حالات الجفاف بعد فترة من عدم التساقطات المطرية، لكن تحديد ظهورها ومداهما ونهايتها يعد أمرًا صعبًا. وبالتالي، من الصعب جدًا تحديد خصائصها بشكل موضوعي من حيث الشدة والمدة والانتشار المكاني.

في هذه الدراسة، استخدمنا تقنيات حديثة للاستشعار عن بعد لمعرفة حالة الجفاف والغطاء النباتي في منطقة ميلة. استخدمنا على مر السنين، وهي الأكثر ملائمة في هذا المجال. NDVI تشير نتائجنا إلى زيادة كبيرة في NDVI و PDSI مؤشرين؛ تتركز الدراسة على ولاية ميلة (الجزائر). توضح النتائج أن منطقة ميلة شهدت تقلبات مناخية كبيرة مثل درجة الحرارة والهطول خلال العقدين الماضيين، مما أثر على النظم البيئية وموارد المياه والأنشطة البشرية بشكل عام. كما تؤكد هذه النتائج على ارتفاع عرضة المنطقة الدراسية للجفاف، خاصة في الأحزمة الجنوبية والجنوبية الشرقية من المنطقة.

الكلمات المفتاحية: ميلة، الجزائر، الاستشعار عن بعد NDVI و PDSI، الجفاف، الغطاء النباتي.

Abstract

Drought is one of the main natural causes of agricultural cover degradation and consequently economic system deterioration. Drought episodes occur after a period without precipitation, but predicting their onset, extent, and end is challenging. Therefore, objectively quantifying their characteristics—intensity, duration, and spatial extent—is very difficult.

In this study, we employed modern remote sensing techniques to assess drought conditions and vegetation cover in the Mila region. We utilized two indices: PDSI and NDVI. Our findings indicate a significant increase in NDVI over the years, which are most suitable for this field. The study focuses on Mila province (Algeria). The results reveal that Mila region has experienced significant climate fluctuations such as temperature and precipitation over the past two decades, impacting ecosystems, water resources, and human activities in general. Furthermore, these results confirm the high vulnerability of the study area to drought, especially in the southern and southeastern subzones of the region.

Key words: Drought, vegetation cover, PDSI and NDVI indices, Mila (Algeria), remote sensing.

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
المخلص	
Abstract	
Sommaire	
Liste des abréviations	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction	1

Chapitre I. La sécheresse

1. Phénomène de sécheresse.....	5
1.1. Définition de la sécheresse	5
1.2. Type de sécheresse	6
1.3. Les effets de la sécheresse.....	10
1.4. Évaluation de la sécheresse : Les indices	11
1.5. Cause de sécheresse	13
1.6. Conséquence de la sécheresse	13
1.7. Impacts de la sécheresse par secteurs	14

Chapitre II. Matériel et méthodes

1. Présentation du secteur d'étude.....	20
1.1. Situation géographique.....	20
1.2. Les reliefs	21
1.3. Géologie générale.....	22
1.4. Le réseau hydrologique	24
1.5. Le climat de wilaya de Mila	26
1.6. La végétation	26
2. Approche méthodologique	28
2.1. Facteurs climatiques, indice de végétation et de sécheresse	28
3. Analyses statistiques.....	30

Chapitre III. Résultats et discussion

Conclusion.....	43
Références bibliographiques	46

Liste des abréviations

A.E.P :	Alimentation en eau potable.
ANBT :	Agence Nationale des Barrages et Transferts.
ANDI :	Agence Nationale de Développement de l'Investissement.
ANIREF :	Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière de Mila.
CETIC :	Centre des Techniques de l'Information et de la Communication
CFM :	Conservation des forêts de Mila.
CNULCD :	Convention des Nations unies sur la lutte contre la désertification.
IISD :	International Institute for Sustainable Development
GIEC :	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
NDMC :	North Dakota Mitigation Center.
NDVI :	Normalized difference vegetation index.
NIR :	Near InfraRed.
OMM :	organisation météorologiques mondial
PDSI :	Palmer Drought Severity Index.
Pr :	Précipitations annuelles.
SPEI :	Indice de Précipitation Évapotranspiration Standardisé.
SPI :	Indice Standard des précipitations.
Tma :	Température annuelle maximale.
Tmax :	Température maximale annuelle moyenne.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau des indices de sécheresse de Palmer, de +4 (extremely wet, extrêmement humide) à -4 (extreme drought, sécheresse extrême)..... 12

Tableau 2 : Résumé du modèle linéaire pour modéliser le changement temporel des facteurs climatique, indice de végétation et de sécheresse (2000 - 2023) dans région Mila, nord-est d l'Algérie.41

Liste des figures

Fig. 1 : Succession de situations de sécheresse et de leurs incidences pour les différents types de sécheresse.....	6
Fig. 2 : Sécheresse des cultures	8
Fig. 3 : Pénurie d'eau dans les vallées	8
Fig. 4 : La situation catastrophique dans de nombreux pays d'Afrique 2017	9
Fig. 5 : Types de sécheresse, manifestations dans le temps et leurs impacts	10
Fig. 6 : La sécheresse dans le monde sur les trois mois (16 février -14 mai 2011).....	17
Fig. 7 : Carte de la Wilaya de Mila.....	21
Fig. 8 : Carte des reliefs de la wilaya de Mila	22
Fig. 9 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des maghrébides	23
Fig. 10 : Carte du réseau hydrographique de la wilaya de MILA	25
Fig. 11 : Les étages bioclimatiques de la wilaya de Mila	26
Fig. 12 : Carte de la couverture forestière de la wilaya de Mila.....	27
Fig. 13 : Google Earth Engine pour la collecte des données	29
Fig. 14 : Logiciel R pour les analyses statistiques réalisées	30
Fig. 15 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de la température maximale (Tmax) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.	33
Fig. 16 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de la précipitation (Pr) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.....	34
Fig. 17 : Variabilité des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2022 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Modèle temporel de la température max moyenne annuelle. La ligne rouge est la régression linéaire et le ruban gris est l'erreur standard.	35
Fig. 18 : Variabilité des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2022 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Modèle temporel de la précipitation moyenne annuelle. La ligne rouge est la régression linéaire et le ruban gris est l'erreur standard.	35
Fig. 19 : Variabilité des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2021 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Les valeurs positives (périodes humides) sont en bleu clair et les valeurs négatives (périodes sèches) sont dans un dégradé de couleur orange. La ligne horizontale en pointillés est fixée à -3, indiquant une sécheresse sévère. La ligne bleue est	

une régression de Loess, indiquant une baisse du PDSI au cours de la dernière décennie (une période plus sèche). Le ruban gris est l'erreur standard.36

Fig. 20 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine. 37

Fig. 21 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.....38

Fig. 22 : Variabilité des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2021 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Modèle temporel de l'indice de végétation NDVI moyenne annuelle. La ligne verte est la régression linéaire et le ruban gris est l'erreur standard. 39

Introduction

Introduction

Le terme climat vient de la racine grecque « klino » qui signifie inclinaison. Les observateurs de la nature avaient en effet constaté que la chaleur dépendait de l'inclinaison des rayons solaires par rapport au sol. Depuis des millénaires, le climat de la terre varie selon les époques et les lieux (**Chapron *et al*, 2010**).

Le changement climatique correspond à une modification durable, de la décennie au million d'années, des paramètres statistiques (paramètres moyens, variabilité) du climat global de la Terre ou de ses divers climats régionaux. Ces changements climatiques sont causés par les modifications de l'atmosphère résultant de sa transformation chimique par les gaz à effet de serre (GES) qui sont naturellement présents dans l'atmosphère. Ces gaz forment une couche autour de la Terre, lui permettant de conserver sa chaleur : c'est l'effet de serre. En effet, le soleil réchauffe la Terre qui, par la suite, réémet une partie de sa chaleur vers l'espace. Les gaz présents dans l'atmosphère emprisonnent une partie de cette chaleur, l'empêchant de retourner dans l'espace. Ce phénomène permet de conserver des températures moyennes de 15 °C sur notre planète. Sans cela, la température y serait d'environ – 18 °C, ce qui ne permettrait pas la présence de la vie telle que nous la connaissons. Cette perturbation de l'équilibre atmosphérique s'exprime par une augmentation des températures moyennes sur terre, modifiant ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques. En effet, les impacts sur l'environnement sont multiples, importants et de plus en plus fréquents : sécheresses, fonte des glaciers et de la glace de mer, élévation du niveau des océans, tempêtes tropicales. Également, ils affectent l'ensemble de la population mondiale et la biodiversité planétaire. Tous ces changements du climat peuvent être dus à des processus intrinsèques à la Terre, à des influences extérieures, ou plus récemment, aux activités humaines (**Pachauri *et al*, 2007**). Ces dernières représentent les principales responsables des changements climatiques actuels et de leurs impacts sur l'environnement. On outre, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), le réchauffement climatique est bien réel et l'activité humaine en est responsable, par l'émission de GES. Par ailleurs, au cours du siècle dernier, un réchauffement moyen de la température à la surface de la terre de 0,74 °C a été observé, alors qu'il était prévu que la température moyenne n'augmenterait que de 0,6 °C. Les prévisions pour 2100 sont encore plus alarmantes, avec une augmentation prévue de la température moyenne de 2 à 4,5 °C (**Pachauri *et al*, 2008**).

Les questions environnementales sont prioritaires en matière de sécurité, d'économie, de santé et de bien-être en raison de leurs impacts sur la vie humaine. Le changement climatique,

exacerbé par les activités humaines, cause des dommages environnementaux majeurs et est devenu un sujet central pour les chercheurs et les gouvernements. Il représente une menace sans précédent pour les populations des pays en développement, qui peinent déjà à assurer leur sécurité alimentaire et leurs conditions de vie. **(Achir, 2016)**. Durant les canicules, la végétation ralentit sa croissance et sa capacité à extraire le carbone de l'atmosphère. Il s'agit d'un basculement vers un déséquilibre climatique de forte ampleur. C'est pour cela, la recherche dans le domaine des impacts des changements climatiques sur la santé est essentielle **(Benssaoud, 2002)**.

Les populations ressentent les effets des crises climatiques principalement par l'eau : les terres s'assèchent et la sécheresse domine. Depuis 1970, les risques liés à la météo, au climat et à l'eau ont représenté 50 % des catastrophes et 45 % des décès, dont 90 % dans les pays en développement où la sécheresse a causé de grandes pertes humaines **(OMM, 2021)**. Les sécheresses menacent le développement durable, avec une augmentation de 29 % de leur fréquence et durée depuis 2000. Plus de 2,3 milliards de personnes sont confrontées au stress hydrique. En Europe, 45 épisodes majeurs de sécheresse ont causé des pertes économiques de plus de 27,8 milliards de dollars, touchant annuellement 15 % de la superficie et 17 % de la population de l'UE **(Guha-Sapir et al., 2021)**. En Afrique, la sécheresse a touché plus de 300 fois en 100 ans, affectant gravement l'Afrique subsaharienne **(Taylor et al., 2017; Guha-Sapir et al., 2021)**.

Dans le Maghreb, la fréquence des sécheresses a augmenté, passant d'une fois tous les dix ans au début du 20^e siècle à cinq ou six fois tous les dix ans actuellement **(IISD, 2003)**. En Algérie du nord, diverses études ont montré une diminution des précipitations et des débits moyens mensuels, accompagnée d'un réchauffement amplifié **(Hamlaoui et al., 2013; Taibi et al., 2017; Zeroual et al., 2017)**.

La sécheresse cause des pertes agricoles et des dommages écologiques importants **(Xingjun et al., 2014)**. À Mila, Algérie, la sécheresse a gravement endommagé les cultures céréalières, réduisant rendement et qualité.

La sécheresse, distincte de l'aridité permanente, se divise en quatre types : météorologique, agricole, hydrologique et socio-économique **(Wilhite et Glantz, 1985)**. Elle est définie par un déficit prolongé de précipitations **(Khaldi, 2005)**. L'élimination de la végétation naturelle aggrave le déséquilibre entre climat, sol et plantes, contribuant à la désertification **(Khaldi, 2005)**.

La télédétection est essentielle pour surveiller ces phénomènes et gérer les impacts environnementaux.

L'objectif principal de ce travail est :

1. Analyser l'évolution de la variabilité climatique dans la wilaya de Mila à l'aide de données météorologiques historiques durant la période 2000-2023 par télédétection.
2. Évaluer les tendances de la sécheresse dans la région, en utilisant des indices tels que le PDSI.
3. Surveiller les changements spatio-temporels de la couverture végétale dans la région étudiée.
4. Fournir des recommandations pour une gestion durable des ressources naturelles face aux défis du changement climatique dans la région étudiée.

Ce manuscrit est présenté, en plus d'une introduction générale, sous forme de quatre chapitres :

- ❖ Le premier chapitre, est consacré à une description générale dans la région de Mila. « caractéristiques de milieu naturel, et milieu physique », ainsi que les conditions climatiques, la géographie, hydrographie, et la localisation de la wilaya de Mila.
- ❖ Le deuxième chapitre est consacré à la définition de phénomène de la sécheresse ainsi ces types. En plus il a exposé quelques indicateurs statistiques caractérisant la sécheresse climatique.
- ❖ Le troisième chapitre du matériel et méthodes, représente une description des indices utilisés, PDSI et NDVI.
- ❖ Le quatrième chapitre, traitera les résultats et la discussion, présentés sous forme de tableaux, de cartes et de courbes graphiques.

Enfin le présent travail, terminera par une conclusion générale.

Chapitre I.

La sécheresse

1. Phénomène de sécheresse

1.1. Définition de la sécheresse

La sécheresse se réfère à un phénomène naturel caractérisé par un manque de précipitations, ainsi que d'autres facteurs climatiques tels que des températures élevées, des vents forts et une faible hydrométrie. Si ce phénomène persiste, il entraîne une diminution du ruissellement des cours d'eau, de l'humidité des sols et un appauvrissement des aquifères (**Safar Zitoun, 2006**). Dans les régions arides et semi-arides, la variabilité des conditions climatiques constitue une contrainte majeure pour l'agriculture (**Yacoubi et al., 1999**). La sécheresse y est un phénomène récurrent qui prend le pas sur les autres obstacles au développement agricole. De plus, les activités humaines ont un impact néfaste sur l'environnement, amplifiant ainsi les effets de la sécheresse. Celle-ci a donc des répercussions non seulement sur le plan météorologique et hydrologique (tel que le remplissage des barrages et le renouvellement des nappes), mais aussi sur le plan agricole (production agricole et animale), environnemental (perturbation des équilibres naturels) et socio-économique (impact négatif sur les facteurs de production et la vie humaine) (**Safar Zitoun, 2019**). Il est donc essentiel d'acquérir une meilleure compréhension de ce phénomène afin de développer des stratégies visant à atténuer ses effets. Différents types de sécheresse peuvent être identifiés, tels que la sécheresse météorologique, la sécheresse agricole, la sécheresse hydrologique et la sécheresse socio-économique. L'Algérie, située en Afrique du Nord, possède un climat principalement semi-aride, mais est également influencée par la Méditerranée. Les régions semi-arides et méditerranéennes sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques en raison de leur grande variabilité climatique inhérente (**Singla et al, 2009**).

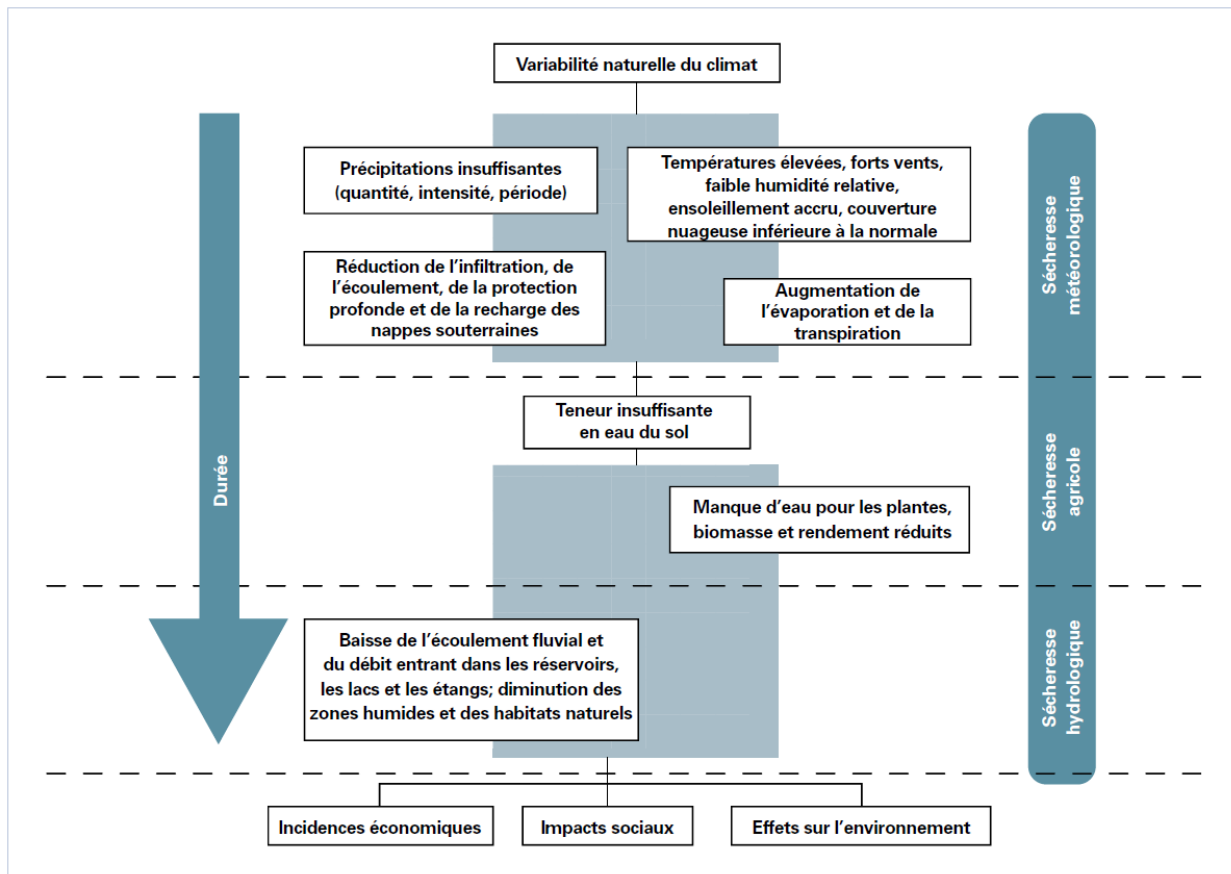


Fig. 1 : Succession de situations de sécheresse et de leurs incidences pour les différents types de sécheresse (Aboub et Hamida, 2019)

La sécheresse doit être considérée par rapport :

- A certaine condition moyenne à long terme du bilan final des précipitations et De l'évapotranspiration dans une région particulière.
- L'échelle temporelle.
- A l'efficacité des précipitations.

La sécheresse possède plusieurs définitions qui se concentrent chacune sur un aspect différent. Elles sont soit conceptuelles soit opérationnelles (NDMC, 2006a).

1.2. Type de sécheresse

A. Météorologique

La sécheresse météorologique appelée aussi atmosphérique, est caractérisée par un manque des précipitations, solides ou liquides sur une période déterminée (Palmer, 1965 ; Dracup,

1980; Boken, 2005). Cette définition est habituellement différente d'une région à l'autre en raison de la variété des climats.

La sécheresse météorologique est typiquement définie par un seuil qui correspond à un déficit spécifique de précipitations par rapport à la moyenne habituelle sur une période donnée (**Organisation météorologique mondiale, 2006**). Le seuil sélectionné varie d'un endroit à l'autre selon les besoins des utilisateurs ou les applications concernées. La sécheresse météorologique peut être détectée à l'aide des indicateurs tels que Indice Standard des précipitations et Indice de Précipitation Évapotranspiration Standardisé (SPI , SPEI).

B. Agricole

La sécheresse agricole est définie par une combinaison de caractéristiques météorologiques d'une sécheresse et ses impacts sur la production agricole. Elle prend en compte des facteurs climatiques tels que l'évapotranspiration, l'humidité du sol et le déficit de la réserve hydrique pour évaluer son impact. Ces éléments induisent un stress hydrique pour la végétation, qu'elle soit naturelle ou cultivée, entraînant des conséquences néfastes sur la production agricole (**Palmer, 1965 ; Panu et Sharma, 2002 ; Wilhelmi *et al* ; 2002**). Les épisodes de sécheresse en Méditerranée sont préoccupants, avec des impacts significatifs sur l'agriculture. La région méditerranéenne se réchauffe plus rapidement que le reste de la planète, ce qui intensifie les sécheresses et les rend plus fréquentes. (**Narsmhan et Srinivasan, 2005**). La question concerne la répartition irrégulière des horaires, qui peuvent être moins fréquents mais coïncider avec de fortes précipitations, phénomène souvent observé sur tout le pourtour méditerranéen. Cette irrégularité peut parfois être causée par des taux d'évaporation élevés. (**Klocke et Heggert, 1990; Vicente-Serrano *et al*; 2010**) ou Le processus de ruissellement est plus intense que la normale saisonnière.

La sécheresse agricole a souvent de graves conséquences sur la production agriculture (**Panu et Sharma, 2002**).



Fig. 2 : Sécheresse des cultures (Mehabi et Zekhref, 2022).

C. Hydrologique

La sécheresse hydrologique se produit lorsque le stockage de l'eau dans les sols et les rivières est inférieur à la moyenne. Il fait référence à la période pendant laquelle les débits des cours d'eau sont insuffisants pour répondre aux besoins en eau déterminés par le système local de gestion de l'eau (Linsley *et al.*, 1975). Par conséquent, ces sécheresses ont des impacts significatifs sur différents secteurs tels que la production agricole, l'irrigation, l'hydroélectricité et l'approvisionnement en eau domestique.



Fig. 3 : Pénurie d'eau dans les vallées (Mehabi et Zekhref, 2022).

D. Socio-économique

Les sécheresses socioéconomiques diffèrent considérablement des autres types de sécheresse dans la mesure où elles reflètent l'offre et la demande de certains produits ou biens économiques (eau, aliments pour le bétail, hydroélectricité, etc.). La sécheresse socio-

économique se manifeste lorsque la demande dépasse l'offre en raison de pénuries d'eau liées au climat. La survenue de telles sécheresses dépend des changements temporels et spatiaux de l'offre et de la demande de ce bien économique. Cet élément dépend toujours des conditions climatiques et peut également être l'eau, la récolte ou l'électricité, qui dépendent toutes des précipitations. L'offre change d'année en année en fonction des précipitations ou de la disponibilité de l'eau, mais la demande peut changer en **raison** de la croissance démographique, du développement ou d'autres facteurs. (Aboub et Hmida , 2019) .



Fig. 4 : La situation catastrophique dans de nombreux pays d'Afrique 2017(Mehabi et Zekhref, 2022).

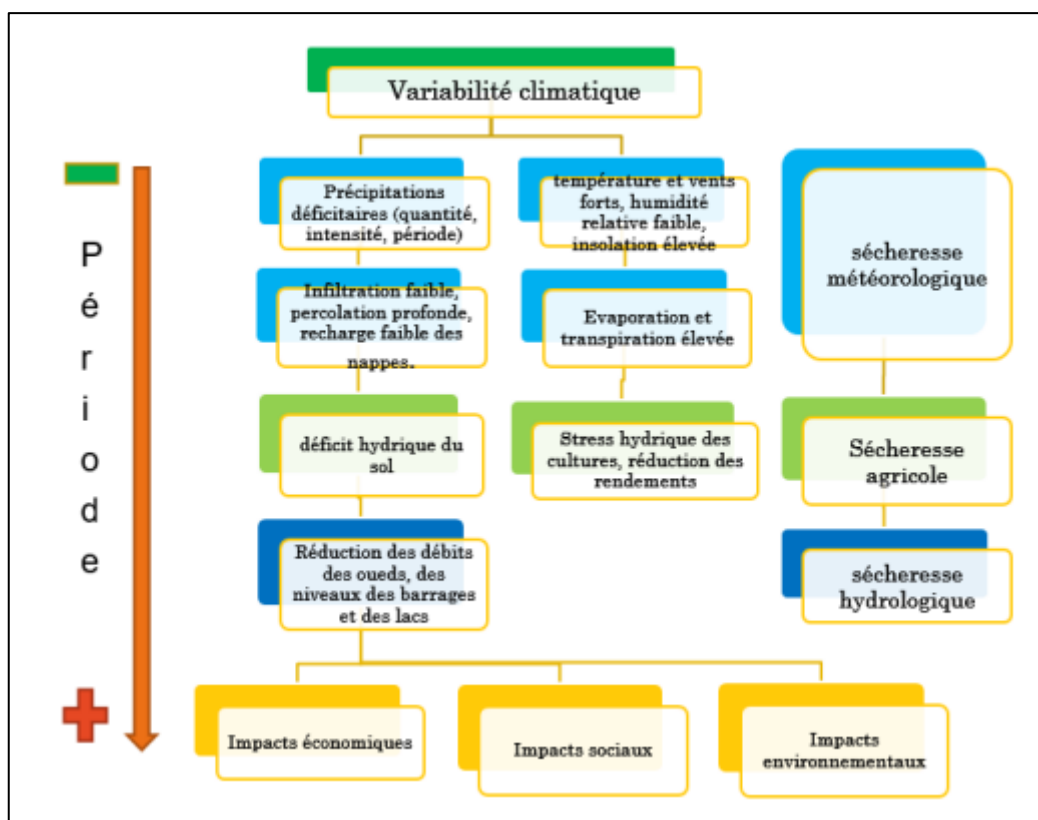


Fig. 5 : Types de sécheresse, manifestations dans le temps et leurs impacts (NDMC, 2005)

1.3. Les effets de la sécheresse

Les effets de la sécheresse sont multiples et touchent divers aspects de l'environnement et de la société. Voici un résumé des conséquences de la sécheresse selon les sources fournies :

- ✓ **Population** : La santé des enfants et des personnes âgées est très fragile face aux fortes chaleurs, car ils ont du mal à s'hydrater, ce qui peut être fatal.
- ✓ **Faune** : Le manque d'eau affecte les poissons et les animaux qui dépendent des points d'eau pour s'abreuver.
- ✓ **Forêts** : La sécheresse rend les arbres plus vulnérables à la déshydratation, augmentant le risque de mortalité des arbres et favorisant les départs de feux.
- ✓ **Agriculture** : La sécheresse impacte l'irrigation des cultures comme le blé en France en raison de la faiblesse des réserves d'eau.
- ✓ **Sols** : Les sols asséchés en automne ne peuvent plus absorber les précipitations, entraînant des inondations et des glissements de terrain.

- ✓ **Réserves d'eau potable** : Les niveaux des rivières, fleuves et nappes phréatiques sont bas, entraînant des restrictions d'eau dans certaines zones rurales.
- ✓ **Production d'électricité** : Les centrales nucléaires sont mises à l'arrêt pendant les sécheresses, ce qui peut impacter l'approvisionnement en électricité.
- ✓ **Conséquences à long terme** : Les effets de la sécheresse persistent même après les pluies, avec des denrées alimentaires rares, des ressources en eau limitées, des sols érodés, un bétail affaibli, et des conflits sociaux et juridiques durables.
- ✓ **Inondations** : Les sécheresses sont souvent suivies d'inondations importantes, surprenant les populations vulnérables et entraînant davantage de souffrances. (**safar-zitoun, 2019**).

1.4. Évaluation de la sécheresse : Les indices

Un indice de sécheresse détermine une valeur numérique liée à certains effets cumulatifs d'un déficit en eau prolongé et anormal. En hydrologie, un indice de sécheresse concerne les niveaux des cours d'eau, des lacs et des réservoirs, comparés à leurs valeurs moyennes. En agriculture, il doit se rapporter aux effets cumulatifs d'un déficit de transpiration absolu ou anormal (**Melhaoui et al., 2016**).

Il existe différents indices pour évaluer la sécheresse :

A. L'indice de sécheresse de Palmer Ou PDSI (Palmer Drought Severity Index)

Indice imaginé par Wayne Palmer (États-Unis) en 1965 mesurant la sécheresse d'une région et prenant en compte à la fois les quantités d'eau apportées (par les précipitations et par les cours d'eau) mais aussi la manière dont elle est absorbée. C'est un principe d'offre et de demande, qui fait intervenir par exemple l'humidité des sols et l'évapotranspiration. L'indice s'obtient à l'aide d'un algorithme intégrant ces différents paramètres. On obtient un nombre positif (climat humide), négatif (sécheresse) ou nul, entre -4 et +4 (**Heim, 2002**).

$$\text{PDSI} = \mathbf{X} (i) = 0.897 \mathbf{X} (i-1) + \mathbf{Z} (i)/3$$

Où: X (i-1) PDSI de la période précédente

Z(i) Indice de l'anomalie en humidité

i Mois de l'année

$$\mathbf{Z}(i) = \mathbf{K} (p - p_c)$$

Où :

K Facteur de poids (Alley, 1984)

P Précipitation actuelle en mm

Pc Précipitation CAFEC (Climatically Appropriate for Existing Conditions) en mm

Tableau 1 : Tableau des indices de sécheresse de Palmer, de +4 (extremely wet, extrêmement humide) à -4 (extreme drought, sécheresse extrême)

Classifications de Palmer	
4.0 ou plus	Extrêmement humide
3.0 à 3.99	Très humide
2.0 à 2.99	Modérément humide
1.0 à 1.99	Légèrement humide
0.5 à 0.99	Début de période humide
0.49 à -0.49	Proche de la normale
-0.5 à -0.99	Début de période sèche
-1.0 à -1.99	Sécheresse légère
-2.0 à -2.99	Sécheresse modérée
-3.0 à -3.99	Sécheresse sévère
-4.0 or less	Sécheresse extrême

B. L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI).

L'indicateur Normalized difference vegetation index (NDVI), ou l'indice de végétation normalisé, est développé par Rouse et al., 1973 et Bannari et al., 1995. Cet indice est très connu par sa sensibilité à la présence d'une végétation verte et par son efficacité pour le suivi des sécheresses notamment dans les milieux agricoles (Kogan, 1990; Vogt, 1995 ; Unganai et Kogan, 1998; Viau *et al.*, 2000; McVicar et Bierwirth, 2001; Boyd *et al.*, 2002). Il répond à la formule suivante :

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{Roug}}{\text{IR} + \text{Roug}}$$

Où :

PIR Réflectance de la région spectrale du proche infrarouge (%)

Rouge Réflectance de la région spectrale du rouge (%)

Le NDVI est indice normaliser ce qui permet de diminuer l'effet de la dégradation de la calibration des capteurs et de minimiser l'effet de la topographie (**Bannari et al., 1995**). Malgré cette normalisation, son interprétation peut être biaisée dans les régions arides à faible densité de végétation et où la présence du sol est importante (**Vogt, 1992 ; Bannari et al., 1995**).

1.5. Cause de sécheresse

La principale cause de la sécheresse est le manque d'eau dû à des précipitations insuffisantes en hiver ou au printemps, conduisant à des réserves d'eau insuffisamment remplies. Ce manque d'eau, combiné aux températures élevées en été, intensifie la sécheresse en augmentant l'évaporation et la transpiration des plantes, asséchant ainsi le sol. Des conditions météorologiques persistantes, telles que la présence d'anticyclones et l'absence de dépressions apportant des précipitations, sont essentielles au développement de conditions de sécheresse.

Alors que des facteurs naturels tels que la rareté de l'eau et les températures élevées contribuent à la sécheresse, les activités humaines l'exacerbent. Une mauvaise gestion de l'eau due à une consommation excessive d'eau dans l'agriculture, l'industrie et les ménages aggrave la sécheresse. Des choix de cultures inappropriés et une irrigation excessive mettent encore plus à rude épreuve les ressources en eau, comme le montre la culture du maïs dans des zones sèches inadaptées en France. La mise en œuvre de restrictions sur l'eau devient cruciale pour empêcher un nouvel épuisement des eaux souterraines et des eaux de surface pendant les périodes de sécheresse (**safar-zitoun, 2019**).

1.6. Conséquence de la sécheresse

La sécheresse est la catastrophe naturelle la plus coûteuse et la plus meurtrière de notre époque. La décision d'en atténuer les effets relève en dernier ressort du pouvoir politique. Il appartient aux gouvernements de tous les pays exposés à ce fléau d'élaborer et de mettre en œuvre, en les adaptant au contexte national, des politiques de lutte contre la sécheresse axée sur les alertes précoces, la prévention et la gestion des risques, a fait valoir le Secrétaire exécutif de la CNULCD, Luc Gnacadja. « Le coût des interventions a posteriori est bien plus élevé que celui de la gestion des risques et des mesures d'anticipation. Aussi faut-il agir sans attendre les prochaines sécheresses et leur cortège de famines et de décès. » (**Mehabi et Zekhref, 2022**).

La sécheresse joue un rôle perturbateur et peut avoir comme conséquences :

- Le manque d'eau pour les cultures vivrières, la diminution du rendement des cultures et des prairies ;
- L'augmentation des disettes et des famines, ainsi que la survenue accrue d'épidémies en raison de la malnutrition.
- Les troubles sociaux et les conflits liés à la compétition pour les ressources naturelles telles que l'eau et la nourriture.
- Migration de la population, l'augmentation des réfugiés climatiques ;
- Des problèmes avec certaines espèces comme des invasions ;
- Réduction de la production d'électricité ;
- La pénurie d'eau pour les industries ;
- La modification, les perturbations voire la destruction des écosystèmes en particulier des zones humides (**Bilan mondial 2011**).

1.7. Impacts de la sécheresse par secteurs

La sécheresse, ainsi que d'autres aléas climatiques comme les vagues de chaleur et les canicules, jouent un rôle destructeur et leurs effets sur les secteurs économiques ont tendance à être immédiats.

A. Société humaine

- Plus de 1,4 milliard de personnes ont été touchées par la sécheresse entre 2000 et 2019. Cela fait de la sécheresse la deuxième catastrophe affectant le plus grand nombre de personnes, après les inondations. L'Afrique a souffert de la sécheresse plus fréquemment que tout autre continent avec 134 sécheresses, dont 70 en Afrique de l'Est (**Wallemacq et al., 2015**).
- La sécheresse est un facteur majeur de volatilité des rendements des cultures. En particulier, elle entraîne de faibles rendements qui peuvent entraîner des pertes financières substantielles (**Bucheli, J. et al., 2021**).

B. Les écosystèmes

- Un tiers des émissions mondiales de dioxyde de carbone est compensé par l'absorption de carbone par les écosystèmes terrestres, mais leur capacité à séquestrer le carbone est très sensible aux épisodes de sécheresse (**Chen, N. et al., 2020**).
- L'augmentation rapide de la température de surface est en corrélation avec le déclin de la biodiversité, y compris des taux d'extinction plus élevés (**Nath, S. et al., 2021**).

C. Secteur des ressources en eau

- La réduction des apports des barrages et des lacs conduira à la réduction des réservoirs réservoirs dans les réservoirs naturels (lacs) et artificiels (barrages), perturbant ainsi la distribution de l'eau dans les zones de collecte et les périmètres d'irrigation.
- Des précipitations insuffisantes réduiront le taux de recharge des eaux souterraines, favorisant ainsi la surexploitation et/ou l'exploitation excessive des aquifères.
- Un écart entre l'offre et la demande en eau, causé par une demande agricole accrue et des besoins en eau potable/industrielle, exercera une pression supplémentaire sur le développement des aquifères, qu'ils soient renouvelables ou non renouvelables (fossiles).
- La détérioration de la qualité de l'eau, due à l'affaiblissement de la dilution des contaminants, amplifie la contamination des réserves d'eau de surface et souterraine.
- Les interruptions de l'approvisionnement en eau et les pénuries d'eau entraînent souvent un compromis entre les différents groupes de consommateurs et des conflits potentiels (**Mehabi et Zekhref, 2022**).

D. La sécheresse dans le monde

La sécheresse a eu des conséquences dramatiques à l'échelle mondiale au cours du siècle dernier.

- En effet, plus de 10 millions de personnes ont perdu la vie en raison de sécheresses majeures au siècle dernier, entraînant des pertes économiques considérables à l'échelle mondiale (**Guha-Sapir et al., 2021**).
- Plus précisément, l'Afrique a été fortement touchée par des sécheresses sévères, avec plus de 300 événements enregistrés au cours des 100 dernières années, représentant 44 % du total mondial. L'Afrique subsaharienne a subi des conséquences dramatiques de

catastrophes climatiques de plus en plus fréquentes et intenses (Taylor *et al.*, 2017 ; Guha-Sapir *et al.*, 2021).

- Egalement, en Europe, 45 épisodes de sécheresse majeurs se sont produits, affectant des millions de personnes et entraînant des pertes économiques de plus de 27,8 milliards de dollars. Actuellement, 15 % de la superficie terrestre et 17 % de la population de l'Union européenne sont touchés par la sécheresse chaque année (Guha-Sapir *et al.*, 2021 ; AEE, 2017).
- On outre, aux États-Unis, les mauvaises récoltes et autres pertes économiques dues à la sécheresse ont totalisé plusieurs centaines de milliards de dollars au cours du siècle dernier, avec 249 milliards de dollars de pertes depuis 1980. (Guha-Sapir *et al.*, 2021)
- Ainsi, en Asie, le nombre total d'êtres humains touchés par la sécheresse a été le plus élevé, soulignant l'ampleur de l'impact de la sécheresse dans cette région. (Guha-Sapir *et al.*, 2021)

❖ Les zones les plus touchées par la sécheresse dans le monde

Des épisodes de sécheresse peuvent frapper n'importe quel pays présentant les conditions climatiques suivantes : une diminution des précipitations sur une certaine période accompagnée de températures élevées. Seules les zones polaires et subpolaires, entièrement recouvertes de glace, sont épargnées par la sécheresse. Les régions les plus vulnérables sont les zones tropicales et subtropicales situées aux tropiques du Cancer et du Capricorne, caractérisées par un climat chaud et sec. Les sécheresses les plus marquantes récentes touchent le Sahel, la Corne de l'Afrique, le Mexique, le nord-est du Brésil, certaines régions de Chine, d'Inde et de Russie, ainsi que l'Europe du Sud-Est. Les pays les plus vulnérables se trouvent principalement dans les zones arides, notamment en Afrique et en Asie occidentale.

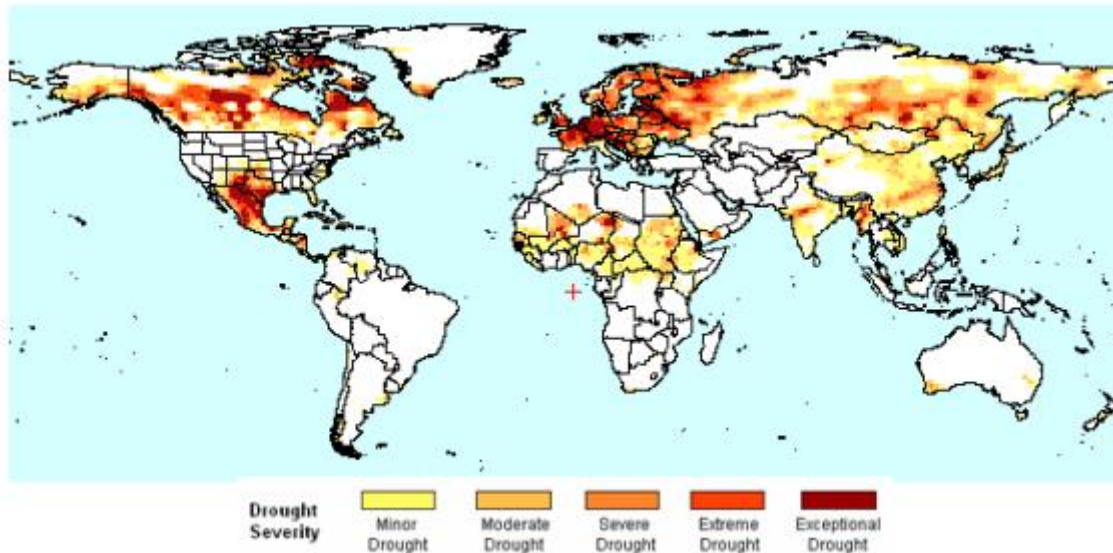


Fig. 6 : La sécheresse dans le monde sur les trois mois (16 février -14 mai 2011) (**sécheresse exceptionnelle au texas, 2011**).

E. La sécheresse en Algérie

La partie de l'Algérie la plus dépendante des précipitations ne représente que 13 % de la superficie totale du pays. C'est aussi la plus dense en population, celle qui concentre les meilleurs sols, les ressources en eau renouvelables, la faune et la flore les plus remarquables du pays. C'est dans cette zone que se concentrent les activités économiques hors hydrocarbures et les infrastructures de base les plus importantes. C'est aussi sur cette bande septentrionale, qui s'étend du Maroc à la Tunisie et que limite au nord la Méditerranée et au sud l'isohyète 200 mm, que s'observent les différentes formes de sécheresse. Ainsi, une certaine disparité existe d'ouest en est et du nord vers le sud. La frange littorale que stoppe l'Atlas tellien au sud, et dont la largeur est de 100 à 150 km, est la zone la plus arrosée, avec une augmentation des moyennes annuelles d'ouest en est (de 400 à plus de 1000 mm / an). Entre l'Atlas tellien et l'Atlas saharien se trouve une large bande de 300 à 350 km contenant les hautes plaines céréalières, la steppe présaharienne à vocation pastorale et les bassins endoréiques les plus caractéristiques. C'est une zone où prédominent les eaux souterraines. La pluviométrie y est entre 100 et 400 mm et la sensibilité à la désertification particulièrement importante.

Le seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m³ par habitant et par an place l'Algérie parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques. La disponibilité en eau théorique qui était de 1500 m³ hab./an en 1962 va passer en dessous du seuil théorique de rareté dans les années 1990 et ne sera que de 430 m³ en 2020. Cette disponibilité

ramenée aux ressources en eau mobilisables serait encore plus réduite (**Rapport de la World Bank Group 1999**)

Pour parvenir à une sécurité alimentaire satisfaisante, il faudrait disposer entre 15 et 20 milliards de m³ par an dont 70% pour l'agriculture, soit 3 à 4 fois la mobilisation actuelle (5 milliards de m³ d'eau par an).

Cette situation de rareté de la ressource est aggravée de manière cyclique par la sécheresse. « Ce qui impliquera ipso facto entre les différents utilisateurs des conflits sérieux qui nécessiteront inmanquablement des arbitrages difficiles pour les pouvoirs publics, et ce d'autant plus que les besoins en alimentation en eau potable (AEP) seront multipliés par 2,5 environ en vingt-cinq ans et qu'ils représenteront pratiquement 40 % des ressources mobilisables vers l'an 2025 »

Le Sahara qui occupe les 87 % du pays est un territoire particulièrement aride et faiblement impacté par les précipitations, sauf pour le massif du Hoggar et du Tassili où les rares pluies apportées par la remontée du front intertropical de convergence en saison des pluies (juillet, aout) viennent alimenter épisodiquement les poches d'eau des massifs volcano-granitiques et les nappes d'inféro-flux fort utiles à la population (**Safar Zitoun, 2006**) en occasionnant certaines années des inondations souvent destructrices.

L'Algérie dans sa totalité et plus précisément le Sahara subit toutefois en période estivale des vagues de chaleur et canicules importantes en intensité et en durée. L'été 2018 a été l'année des records de températures élevées dans le Monde. En Algérie, des pics de chaleur avoisinant les 60 degrés Celsius ont été observées à In Salah et Adrar. Cette canicule à l'échelle du globe a eu des conséquences négatives sur la santé humaine et animale et provoqué des effets inattendus tels que la flambée des prix des céréales sur le marché mondial due à une diminution importante de la production sous l'impact de la sécheresse (**Deluzarche, 2018**)

Chapitre II.

Matériel et méthodes

1. Présentation du secteur d'étude

1.1. Situation géographique

La wilaya de Mila est située dans le Nord-Est algérien à 464 m d'altitude, et à 73 Km de la mer méditerranée". Également, elle est située dans la partie Est de l'Atlas tellien, une chaîne de montagnes qui s'étendent d'Ouest en Est sur l'ensemble du territoire Nord du pays (**ANDI, 2013**).

Elle est caractérisée par une superficie totale de 3.480,54 km², soit 0,14% de la superficie totale du pays, avec une population de 810370 habitants en décembre 2011, ce qui représente une densité de 90,75 résidents par kilomètre carré. C'est lors du découpage administratif de 1984 que Mila a été divisée en 32 communes (**Chaalal, 2012**).

La wilaya est limitée (figure 07) :

- Au Nord-Ouest par la wilaya de Jijel.
- Au Nord Est par la wilaya de Constantine.
- A l'Ouest par la wilaya de Sétif.
- A l'Est par les wilayas de Constantine et Skikda.
- Au Sud Est par la wilaya d'Oum El Bouaghi.
- Au Sud par la wilaya de Batna.

La carte de notre région d'étude (wilaya de Mila) a été réalisée par le logiciel Qgis 3.36

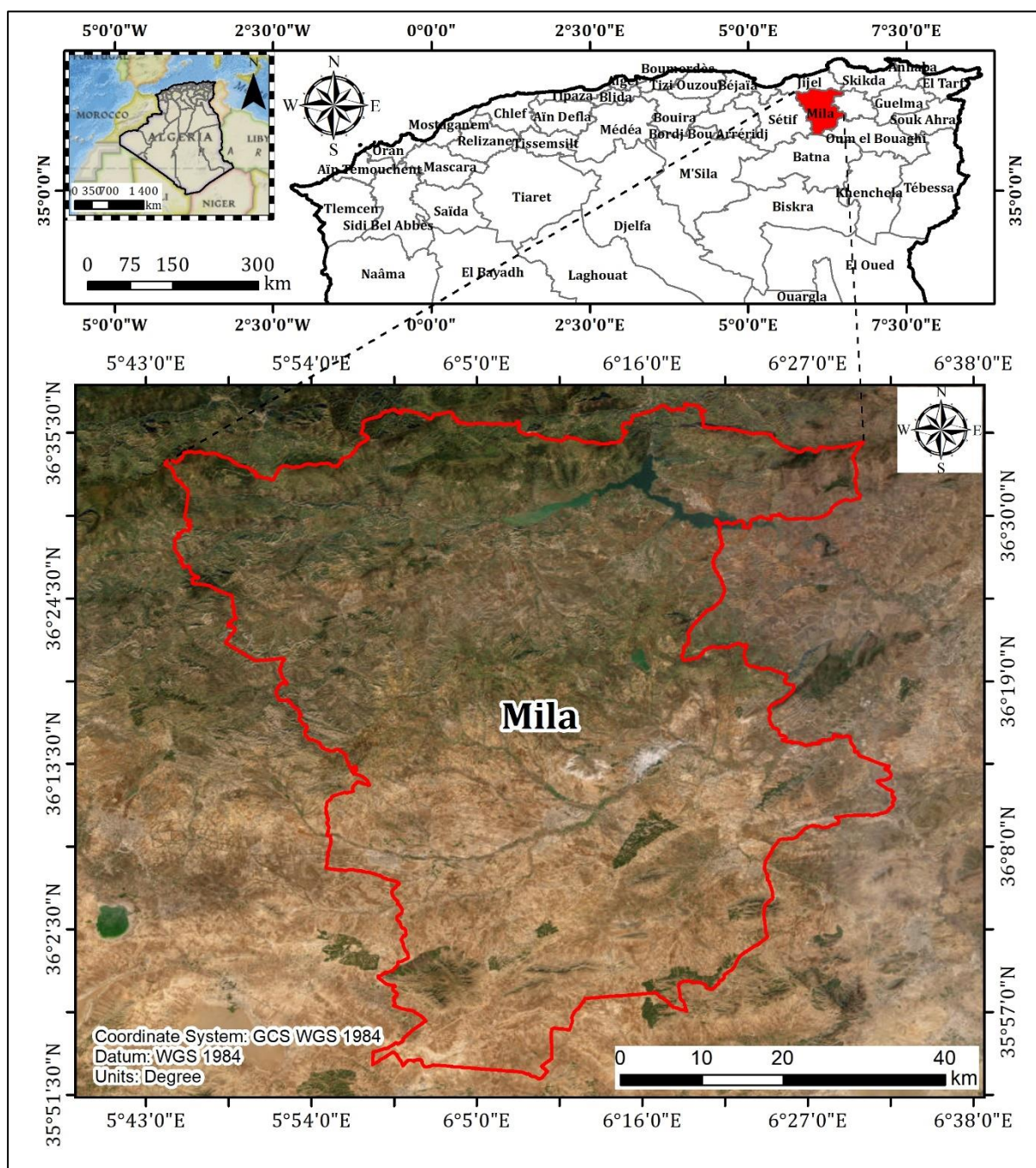


Fig. 7 : Carte de la Wilaya de Mila.

1.2. Les reliefs

La wilaya de Mila est entièrement entourée de chaînes montagneuses appartenant à différents domaines paléogéographiques :

- ✓ Au nord, un ensemble de hautes montagnes, caractérisé par les altitudes très élevées et des pentes excessivement marquées, telles que : Djebel M'cid Aicha et Sidi Driss.

- ✓ Au sud, un ensemble de hautes plaines (plaines et collines), telles que : Djebel Osman et Grouz.
- ✓ Au centre, un ensemble associant vallées collines et piémonts voire même quelques hauts versants.
- ✓ Jebel Akhal, Chattaba et Kheneg de l'Est, et Djebel Boucherf et Oukissene par l'Oued (ANDI, 2013 ; Merghadi *et al.*, 2018).

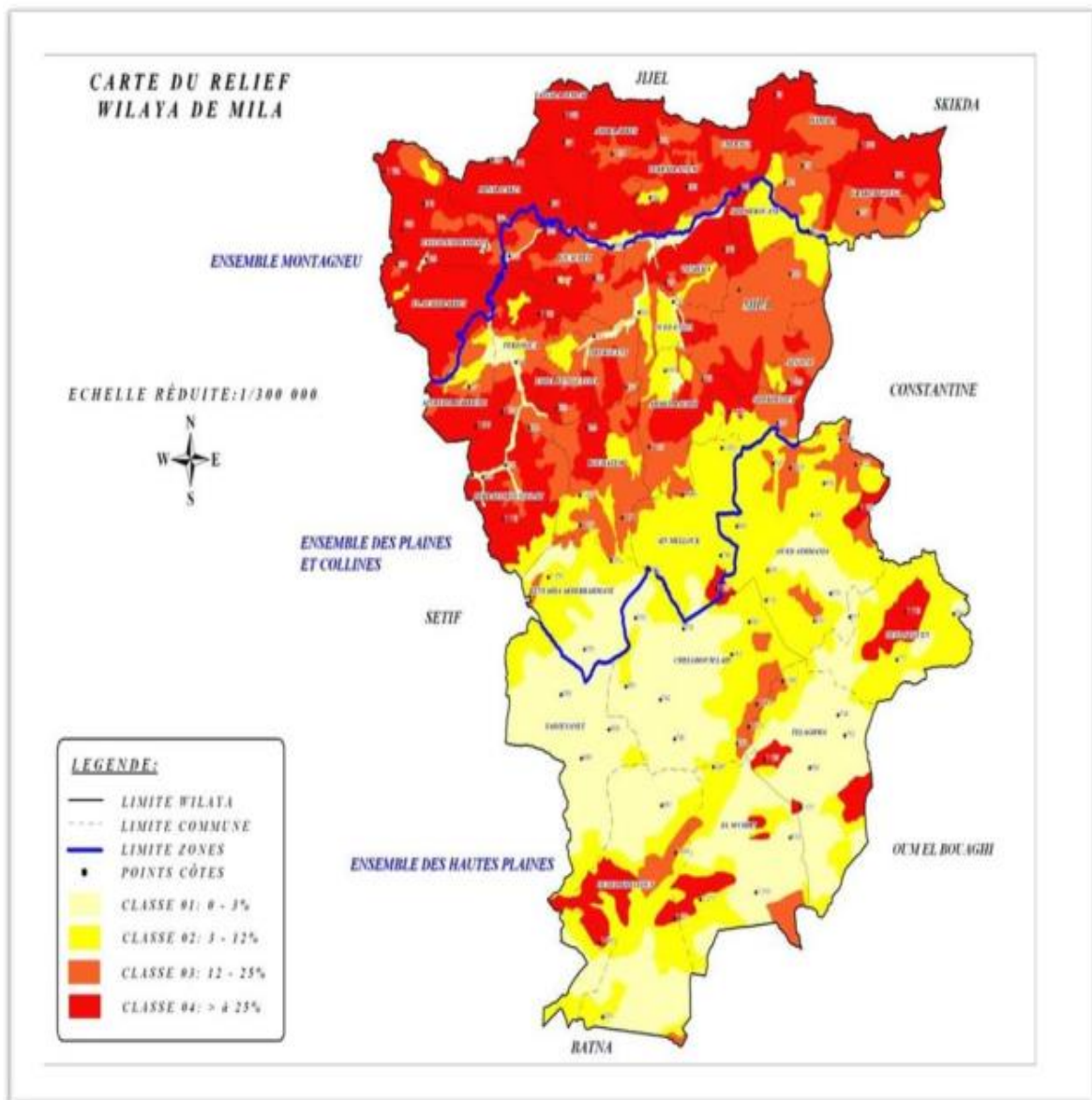


Fig. 8 : Carte des reliefs de la wilaya de Mila (CFM, 2019)

1.3. Géologie générale

Mila fait partie du domaine tellien, une région orientale de la chaîne des maghrébines, qui forme la chaîne alpine d'Afrique du Nord (Durand Delga, 1969).

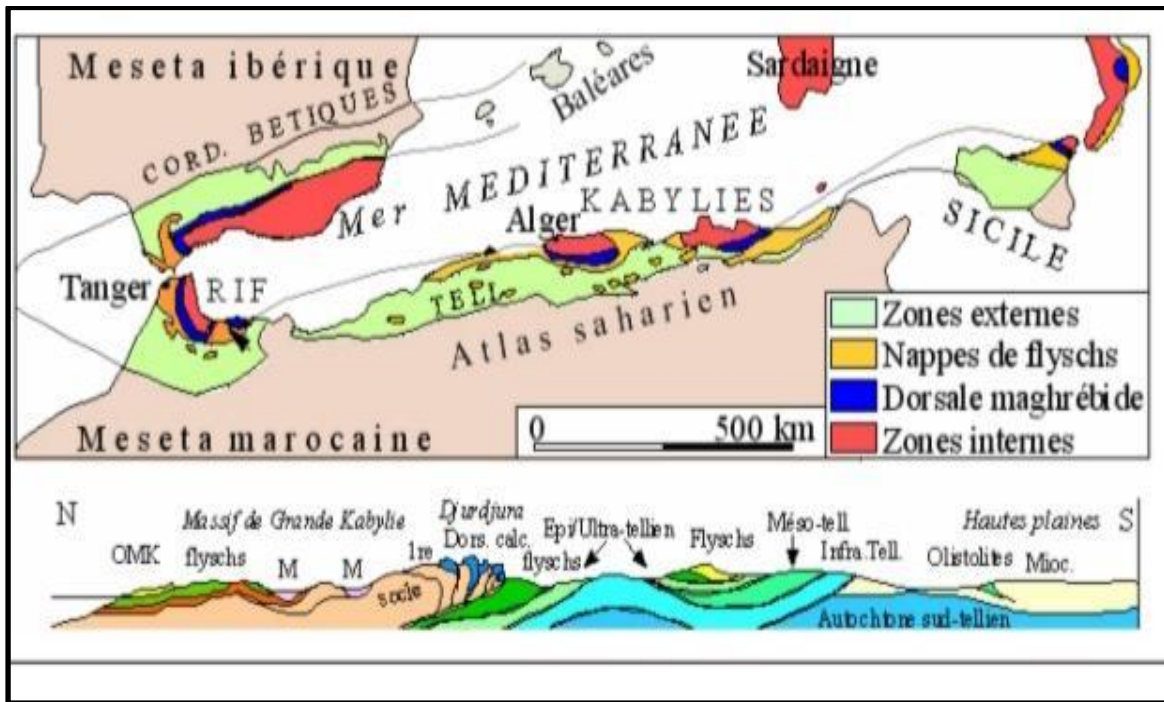


Fig. 9 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des maghrébides (Durand-Delga, 1969).

La géologie de la région se caractérise par plusieurs formations distinctes :

➤ **Formations Mésozoïques (Crétacées) :**

- Localisées principalement dans la partie sud de la forêt des Mouias.
- Principalement constituées de marnes et de marno-calcaires.

➤ **Formations Cénozoïques :**

- Composées de marnes noires du Paléocène surmontées de calcaires, ainsi que de marnes de l'Éocène.

➤ **Marnes du Paléocène :**

- Présentes le long des deux rives de l'Oued El Kebir.
- Caractérisées par leur aspect feuilleté et leur déplacement en plaquettes.
- Contiennent des résidus de gypse et de calcite dans les joints.

➤ **Calcaires de l'Éocène (Attribués à l'Yprésien) :**

- Composés de formations calcaires, de calcaires marneux, de calcaires à silex et de calcaires dolomitiques.

- Présence de fines couches de marnes schisteuses.
- *Marnes de l'Éocène (Âge Lutétien) :*
 - Similarités avec les marnes du Paléocène.
 - Présentent une forte déformation et altération, de couleur foncée à noire.
- *Formations Néogènes (Bassin de Mila) :*
 - Principalement constituées de dépôts détritiques (graviers, sables, conglomérats, argiles), de dépôts évaporitiques (gypse, sel gemme) et de calcaires.
 - Comprennent des microconglomérats, des grés sableux, des argiles marneuses à gypse, des conglomérats et des calcaires lacustres.
 - Recouvertes par des dépôts quaternaires.
- *Dépôts Quaternaires :*
 - Fréquents dans la région, constituent la couverture récente des formations géologiques mentionnées.
 - Principalement composés d'argiles rouges recouvertes d'une couche de terre végétale.
 - Localisés dans les plaines inondables et les terrasses alluviales des cours d'eau, comprenant des argiles limoneuses, sableuses et colluvions. (Zouaidia, 2006).

1.4. Le réseau hydrologique

La wilaya de Mila abrite un important réseau hydrographique composé de rivières et de barrages, pour gérer la pénurie d'eau à Mila n'est pas une tâche aisée car celle-ci est un frein pour l'activité économique et la qualité de vie des ménages.

La wilaya de Mila dispose de :

A. Les barrages

Le barrage de Béni-Haroun le plus grand barrage d'eau au niveau national, qui alimente une grande partie de l'est algérien avec de l'eau potable et de l'eau d'irrigation. Sa capacité de stockage est de 998 hm³.

Le barrage de Sidi Khalifa est un barrage transfert des eaux, située au Sud de la wilaya de Mila. Il fait partie du grand transfert de barrage de Béni Haroun par lequel transitent à annuellement les 504 mm³, Il servira à alimenter 5 wilayas de l'est algérien. À environ 25 km au

sud du chef–lieu, près de ville de Sidi Khalifa. Il possède une capacité de 33600000 m³ et une longueur de digue de 600 m (Soukhal, 2011).

- Le barrage d'Oued el Athmania d'une capacité de stockage de 33 hm³.
- Le barrage de Hammam Ghrouz d'une capacité de stockage de 41 hm³.

B. Les puits

Le nombre de puits recensé est de 57 avec un débit mobilisé de 6.685.632 m³/ans. Ils se situent plutôt dans la partie méridionale de la wilaya (Soukhal, 2011).

C. Les forages

Il existe 127 puits publics avec un taux de remplissage de 40 cm³/an, et 950 puits sont privés de remplissage à un taux de 6,7 mètres cubes/an (Soukhal, 2011).

D. Les retenues collinaires

Au nombre de 4 d'un taux de remplissage de 1,5 hm³ (Soukhal, 2011).

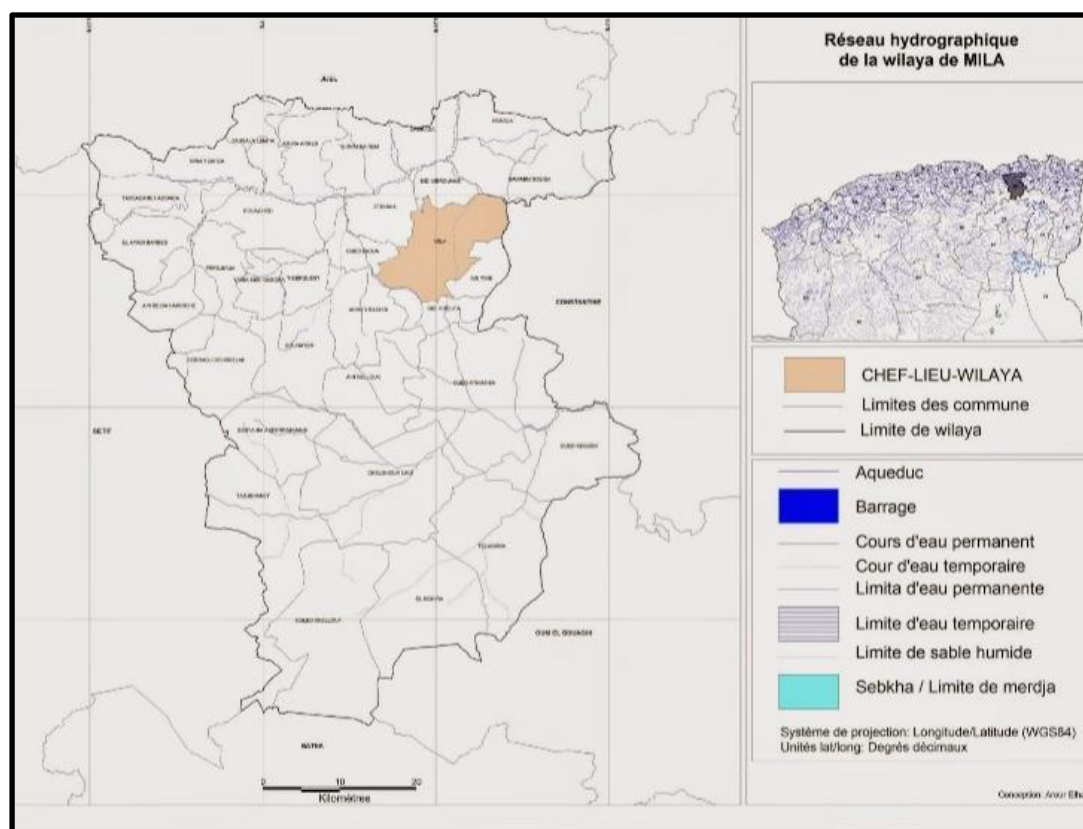


Fig. 10 : Carte du réseau hydrographique de la wilaya de MILA (ANIREF, 2021).

1.5. Le climat de wilaya de Mila

Le climat de la wilaya de Mila est de type méditerranéen. Il se distingue par un hiver doux et pluvieux et une longue saison estivale chaude et sèche qui se déroule de mai à octobre, avec des variations saisonnières et spatiales (Soukhal, 2011). En général, la wilaya de Mila se distingue par cinq niveaux bioclimatiques répartis de la manière suivante :

- Étage bioclimatique per humide au niveau de quelques sites de l'extrême nord de la wilaya de Mila ;
- Étage bioclimatique humide dans le Nord de la wilaya de Mila ;
- Étage bioclimatique subhumide sur une bonne étendue du centre de la wilaya de Mila ;
- Étage bioclimatique semi-aride qui caractérise les Daïras Sud de la wilaya ;
- Étage bioclimatique aride sur une petite étendue dans l'extrême sud de la wilaya de Mila.



Fig. 11 : Les étages bioclimatiques de la wilaya de Mila (Laala, 2019).

1.6. La végétation

Considérée comme wilaya agricole vu son potentiel naturel s'étendant sur des superficies comme suit (service d'Agriculture de Mila, 2015) :

- Surface totale est de : 348.045 hectares
- Surface agricole totale : 315.745 hectares
- Surface labourée : 237.557 hectares (soit 75% de la surface agricole) (service d'Agriculture de Mila, 2015) (Bouchair et Saadallah, 2014).



Fig. 12 : Carte de la couverture forestière de la wilaya de Mila (CETIC, 2008).

2. Approche méthodologique

2.1. Facteurs climatiques, indice de végétation et de sécheresse

Nous avons utilisé plusieurs paramètres pour évaluer le climat de la région, notamment la température annuelle maximale (T_{ma}), les précipitations annuelles (Pr), l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Ces données ont été recueillies sur la période 2000-2023 et sont basées sur des mesures mensuelles de T_{ma}, Pr et PDSI obtenues à partir de TerraClimate (**Abatzoglou *et al.*, 2018**), avec une résolution spatiale d'environ $\sim 4,5$ km, grâce à Google Earth Engine.

En fait, TerraClimate est une base de données mondiale de haute résolution (4 km) qui fournit des informations mensuelles sur le climat et les bilans hydrologiques de 1958 à nos jours. Conçu pour soutenir la recherche environnementale et les analyses climatiques, TerraClimate intègre des données provenant de diverses sources, y compris les observations climatiques et les modèles climatiques de réanalyse. Les variables couvertes incluent la température, les précipitations, l'évapotranspiration, et l'humidité du sol, entre autres. Ces données sont essentielles pour comprendre les impacts du changement climatique sur les systèmes terrestres, et elles sont largement utilisées par les chercheurs, les décideurs politiques, et les gestionnaires de ressources naturelles pour planifier et prendre des décisions informées.

Egalement, Google Earth Engine est une plateforme d'analyse géospatiale à grande échelle qui permet aux chercheurs, scientifiques et développeurs d'analyser et de visualiser d'énormes ensembles de données géospatiales. Lancée par Google, cette plateforme tire parti de la puissance du cloud computing pour traiter des données à une échelle sans précédent, facilitant l'accès et l'analyse de données satellitaires historiques et actuelles. Les utilisateurs peuvent exploiter une vaste bibliothèque de données publiques, incluant des images satellites et des données climatologiques, pour effectuer des analyses environnementales, surveiller les changements dans les écosystèmes, et évaluer les impacts du changement climatique. Grâce à son interface conviviale et à ses capacités de traitement rapide, Google Earth Engine révolutionne la manière dont les données géospatiales sont utilisées pour la recherche scientifique et la prise de décisions informées.

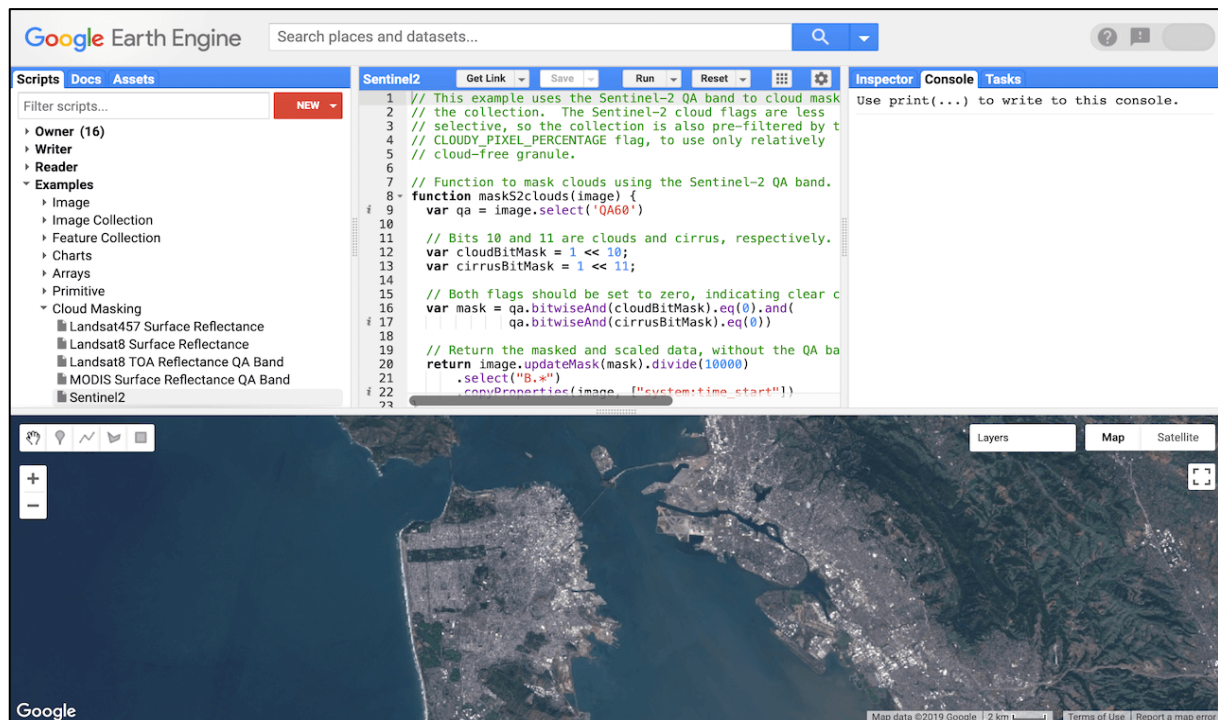


Fig. 13 : Google Earth Engine pour la collecte des données [1].

Parmi les paramètres mesurés c'est le PDSI, qui représente un indice standardisé évaluant l'humidité relative du sol en prenant en compte les précipitations antérieures, l'humidité disponible et la demande en humidité (Palmer 1965). Une valeur positive de PDSI indique des conditions plus humides que la normale, tandis qu'une valeur négative indique une sécheresse. Une valeur PDSI > 4 suggère des conditions très humides, tandis qu'une valeur PDSI < -4 indique une sécheresse extrême. En outre, nous avons spécifiquement relevé le nombre de valeurs de PDSI inférieures à -3 , ce qui signifie une sécheresse sévère. Cet indice est particulièrement utile pour surveiller les sécheresses à long terme et leurs impacts sur l'agriculture, les ressources en eau, et les écosystèmes naturels. Le PDSI est couramment utilisé par les climatologues, les agriculteurs, et les gestionnaires de l'eau pour planifier et prendre des décisions éclairées en matière de gestion des ressources et d'adaptation au changement climatique.

En effet, l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI) est un indicateur clé utilisé en télédétection pour évaluer la santé et la densité de la végétation sur la surface terrestre. Calculé à partir des images satellites, le NDVI compare la lumière rouge visible, absorbée par la chlorophylle des plantes, à la lumière proche infrarouge, réfléchiée par la végétation saine. Les valeurs du NDVI varient de -1 à $+1$, les valeurs positives indiquant la présence de végétation verte et dense, tandis que les valeurs proches de zéro ou négatives indiquent des zones avec peu

ou pas de végétation, comme les déserts ou les plans d'eau. Cet indice est largement utilisé dans les domaines de l'agriculture, de la foresterie, de la gestion des ressources naturelles et de la surveillance environnementale, permettant de suivre les changements saisonniers, détecter le stress hydrique, et estimer les rendements agricoles.

Le NDVI est obtenu en analysant les bandes infrarouges proches (NIR) et rouges visibles d'un capteur multispectral des satellites Landsat 5, 7 et 8, avec une résolution de 30 mètres, grâce à Google Earth Engine, selon la méthode décrite par Kogan (1997). Sa valeur est calculée à l'aide de l'équation 1 ci-dessous :

Formule de l'indice de végétation par différence normalisée :

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

3. Analyses statistiques

Toutes les analyses statistiques ont été réalisées en utilisant le logiciel R version 4.4.0 (R Development Core Team, 2024). Pour évaluer les évolutions temporelles des paramètres climatiques, des régressions linéaires ont été effectuées afin de déterminer les variations annuelles de la température annuelle maximale (Tma), des précipitations annuelles (Pr), de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) sur la période 2000-2023. Les résultats de cette analyse ont été présentés sous forme de moyenne ± écart type (SD).

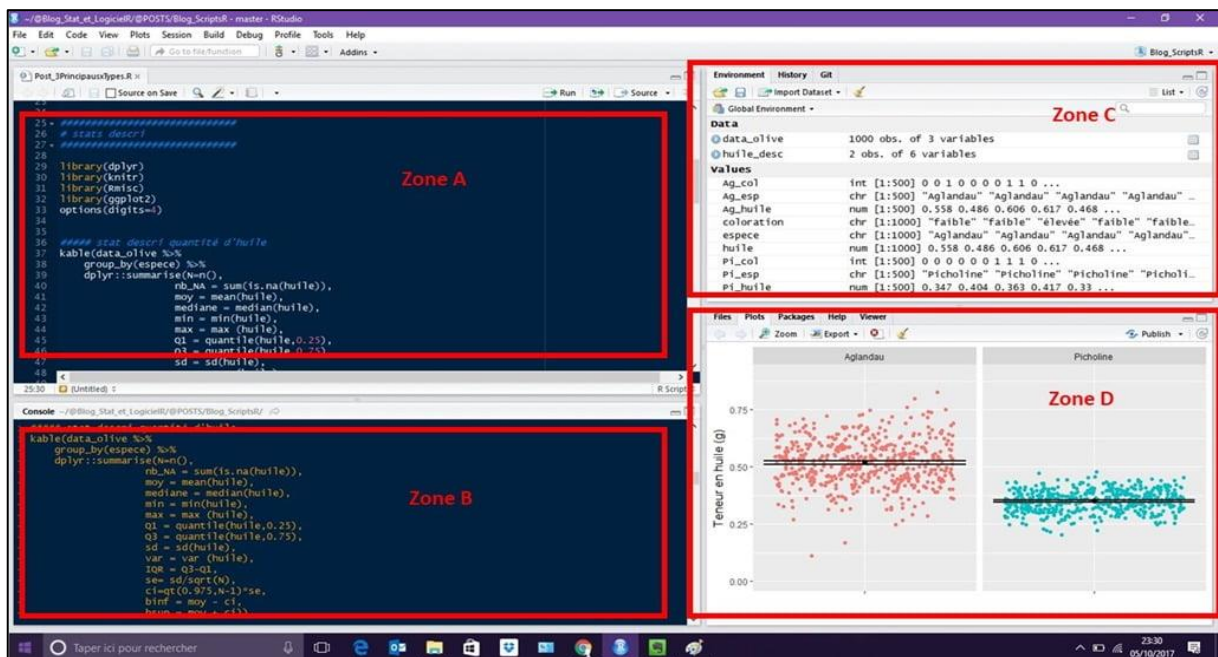


Fig. 14 : Logiciel R pour les analyses statistiques réalisées [2].

Chapitre III.

Résultats et discussion

La sécheresse représente un événement climatique multifacette avec des répercussions significatives sur les secteurs agricole et hydrologique, amplifiant les vulnérabilités environnementales et socio-économiques. Sa caractérisation repose sur des facteurs tels que la durée, la fréquence et l'intensité (**Cavus & Aksoy. 2020; Cavus et al., 2023**). Par exemple, de courtes périodes de temps sec ne durant que quelques semaines constituent ce que l'on appelle la "sécheresse météorologique". Lorsque ces conditions sèches persistent sur une période plus prolongée, généralement de 3 à 9 mois, elles peuvent affecter l'humidité du sol et la végétation, qualifiées de "sécheresse agricole" (**Gevaert et al., 2018**). Si la période de sécheresse dépasse 9 mois, les répercussions se font sentir sur les systèmes hydrologiques, qualifiées de "sécheresse hydrologique" (**Wang et al., 2022**). Une fréquence accrue des événements de sécheresse, en particulier des types agricoles et hydrologiques, peut induire des altérations significatives tant dans les paysages socio-économiques que dans les écosystèmes (**Vicente-Serrano et al., 2020**)

L'Afrique du Nord, l'une des régions les plus chaudes et arides au monde, est confrontée à un impact significatif du changement climatique sur ses écosystèmes. Les études récentes (**Bucchignani et al., 2018 ; Derradji et al., 2022 ; Tanarhte et al., 2024**) soulignent une augmentation des températures et une variabilité croissante des précipitations dans la région, ce qui pourrait avoir des répercussions majeures. Les données de température maximale annuelle moyenne (Tmax) et de précipitations annuelles (Pr) entre 2000 et 2023 dans la région étudiée montrent des variations temporelles significatives (Fig.15, 16).

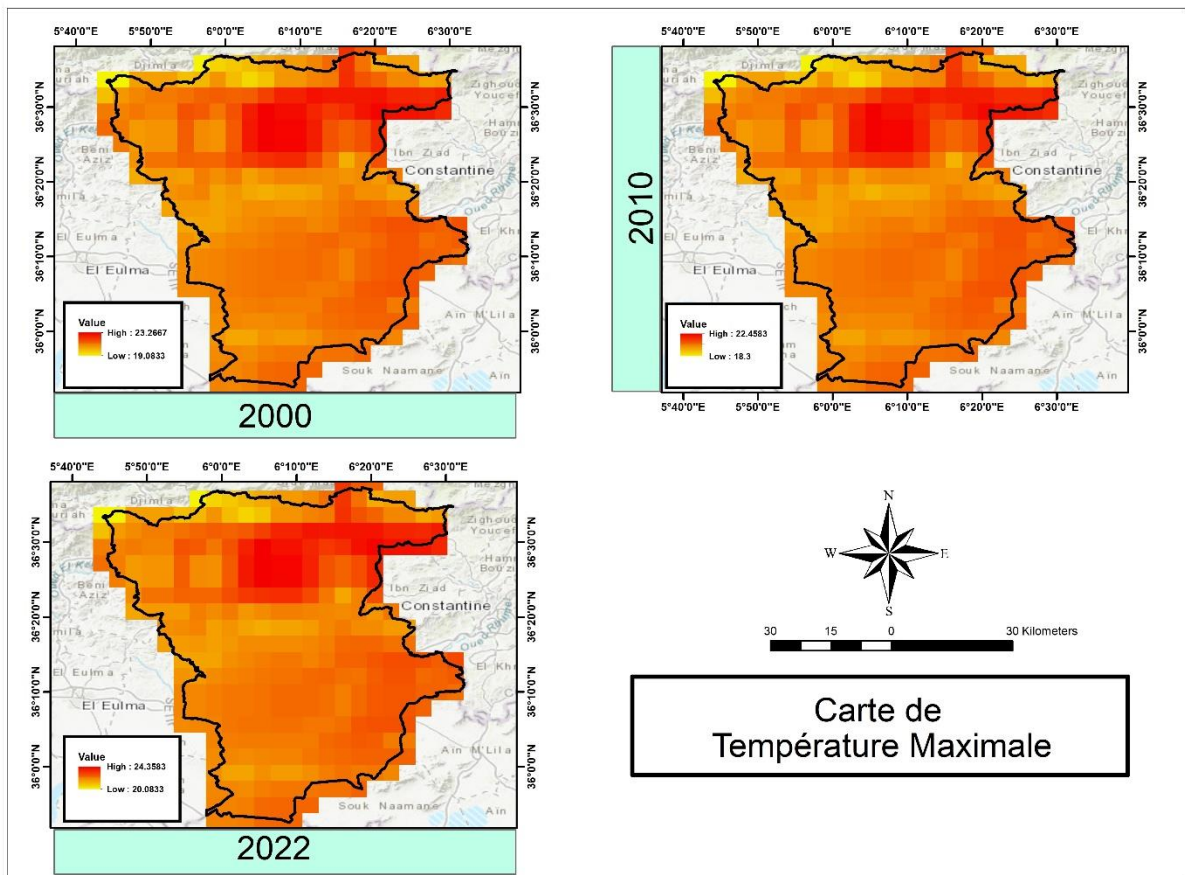


Fig. 15 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de la température maximale (Tmax) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.

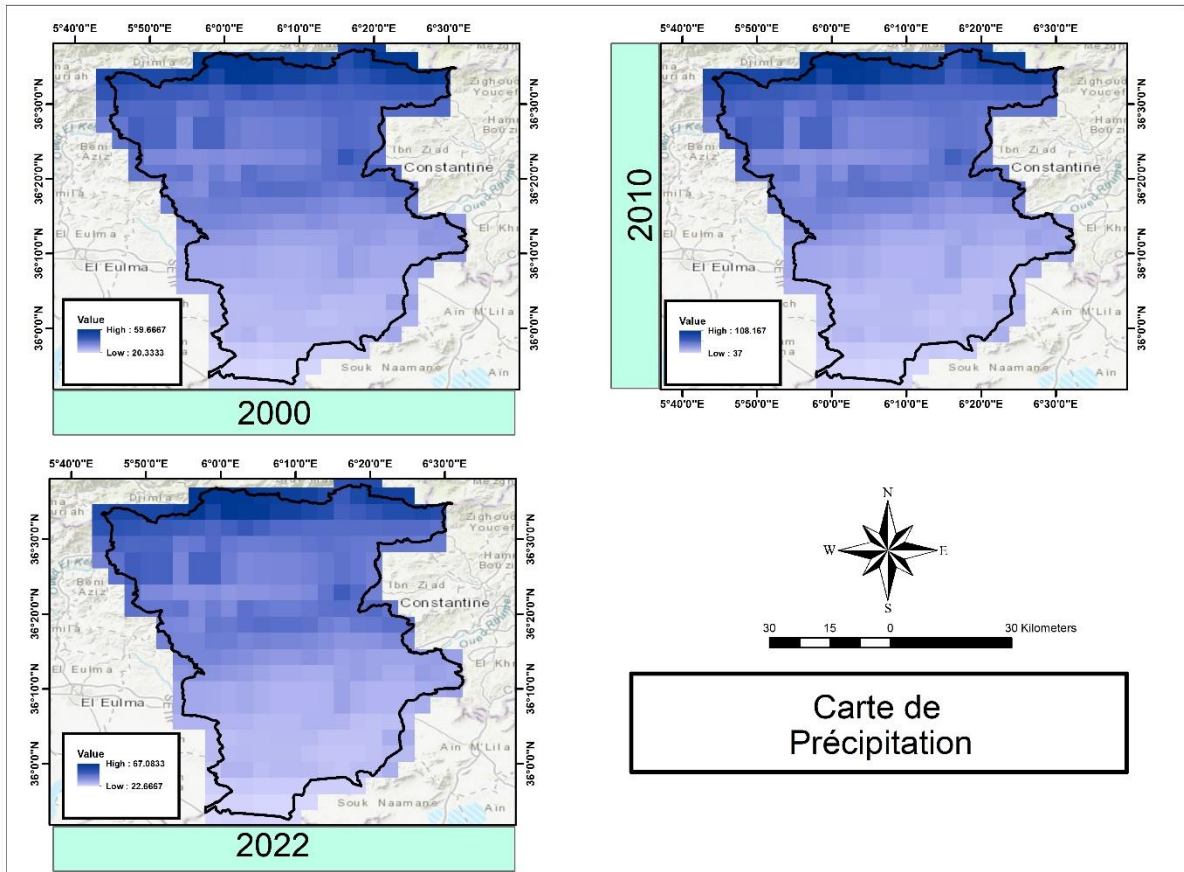


Fig. 16 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de la précipitation (Pr) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.

Par exemple, la Tmax dans la région de Mila a augmenté de manière significative sur cette période, avec une tendance annuelle de 0,03 °C (LM : P = 0,009, R² = 0,34) (Tableau 2) (Fig.17). D'autre part, les Pr dans la région de Mila ont affiché des fluctuations importantes d'une année à l'autre, avec une tendance globale à la baisse non significative, présentant une pente temporelle de -0,86 mm par an (P = 0,36, R² = 0,1) (Tableau 2) (Fig.18).

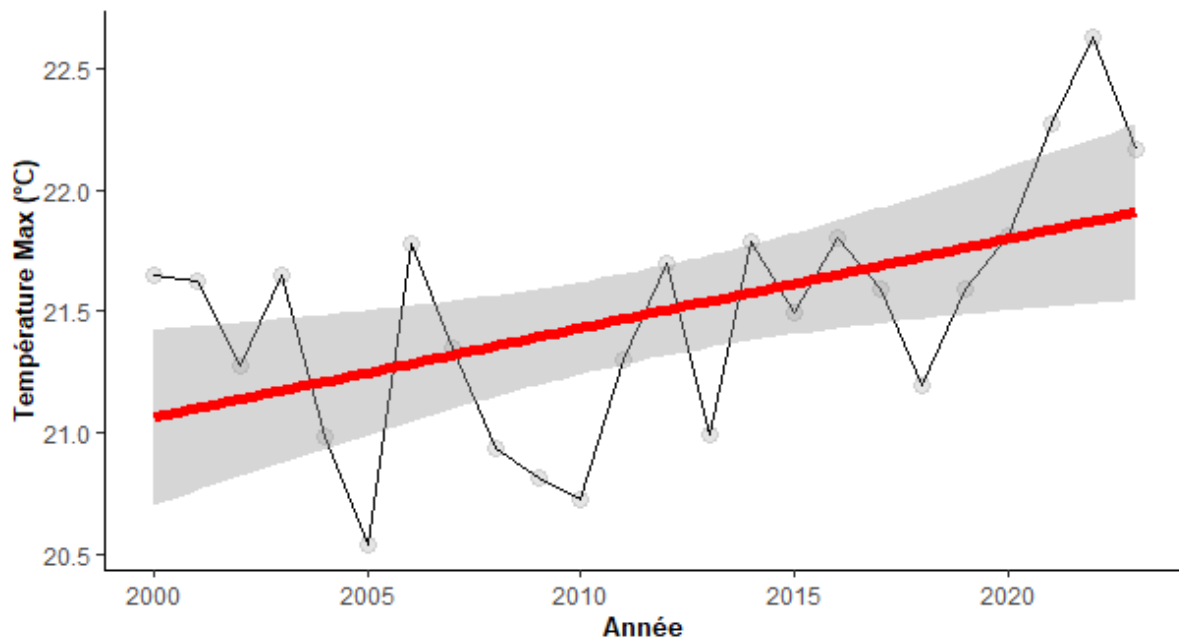


Fig. 17 : Variations des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2022 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Modèle temporel de la température max moyenne annuelle. La ligne rouge est la régression linéaire et le ruban gris est l'erreur standard.

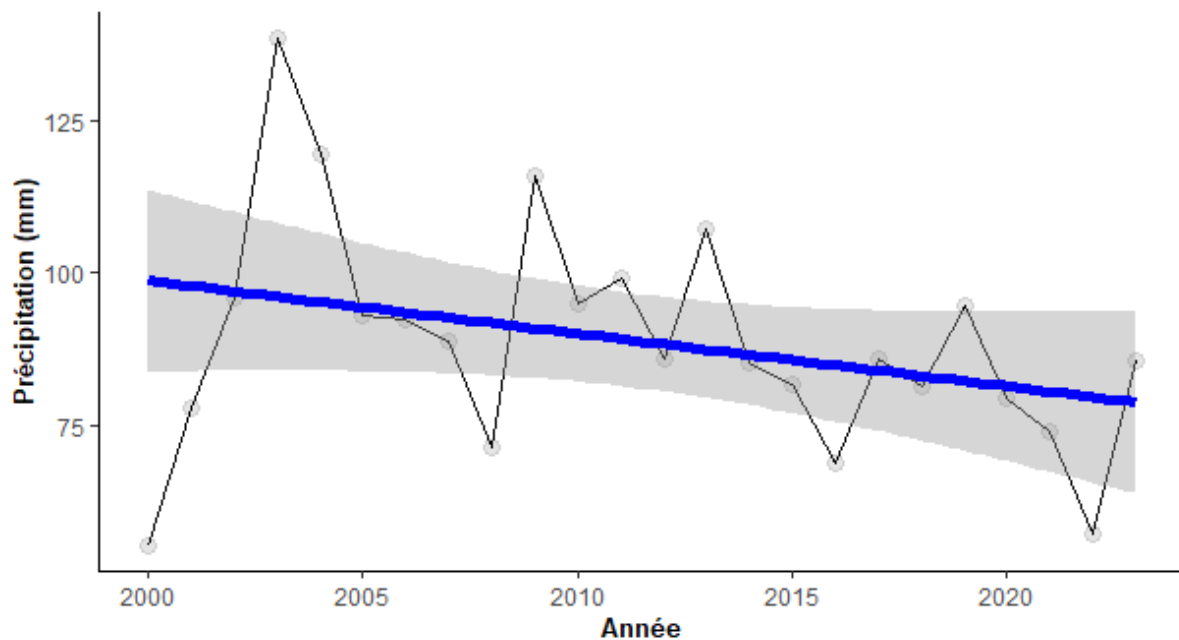


Fig. 18 : Variations des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2022 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Modèle temporel de la précipitation moyenne annuelle. La ligne rouge est la régression linéaire et le ruban gris est l'erreur standard.

De manière générale, une diminution de l'indice de sécheresse standardisé (PDSI) a été remarquée sur la période (2000-2023), avec une moyenne de $-0,07$ par an ($P = 0,3$, $R^2 = 0,16$) (Tableau 2) (Fig.19). Les valeurs négatives de PDSI étaient plus fréquentes (74 %) que les valeurs positives, indiquant des périodes de sécheresse prédominantes. Six valeurs (26 %) étaient inférieures au seuil de -3 (sécheresse sévère) entre 2000 et 2023, avec une moyenne de $-3,79 \pm 0,57$ ($N = 06$). Notamment, trois (50 %) de ces valeurs ont été enregistrées au cours de la dernière décennie (2012-2023), soulignant une sévérité accrue de la sécheresse durant cette période.

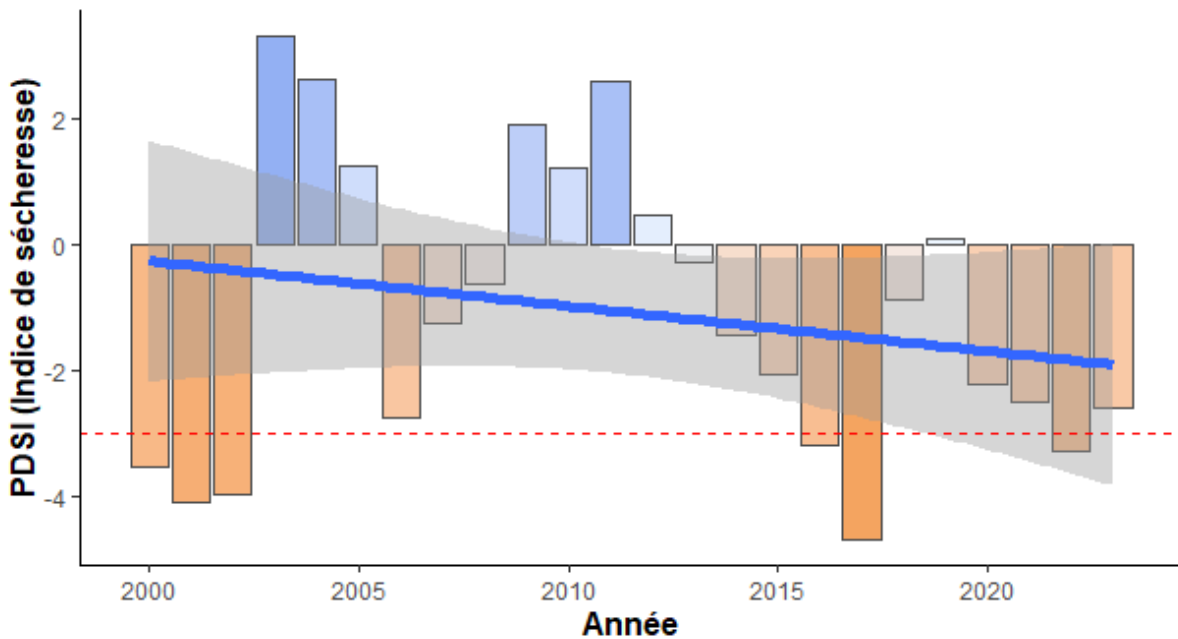


Fig. 19 : Variabilité des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2021 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Les valeurs positives (périodes humides) sont en bleu clair et les valeurs négatives (périodes sèches) sont dans un dégradé de couleur orange. La ligne horizontale en pointillés est fixée à -3 , indiquant une sécheresse sévère. La ligne bleue est une régression de Loess, indiquant une baisse du PDSI au cours de la dernière décennie (une période plus sèche). Le ruban gris est l'erreur standard.

La figure (20) illustre un changement spatial du PDSI sur la période (2000-2023), montrant une sécheresse plus prononcée dans certaines régions au fil du temps. Par exemple, la carte montre une sécheresse plus importante et plus sévère au Nord de Mila (Hamala, Chigara , Terrai bainen , Amira arres , Tassala Lamtai , Minar Zarza , Tassadane Haddada , Grarem Gouga, Zeghaia , Rouached) en 2000 , mais en 2010 la sévérité est observée dans la partie Sud Est de Mila (Teleghma , Oued Athmania , Oued Seguin) , par contre en 2022 la sévérité a été observée dans la partie Sud de la région (Chelghoum Laid , Tadjenanet , M'chira , Ouled Khlouf).

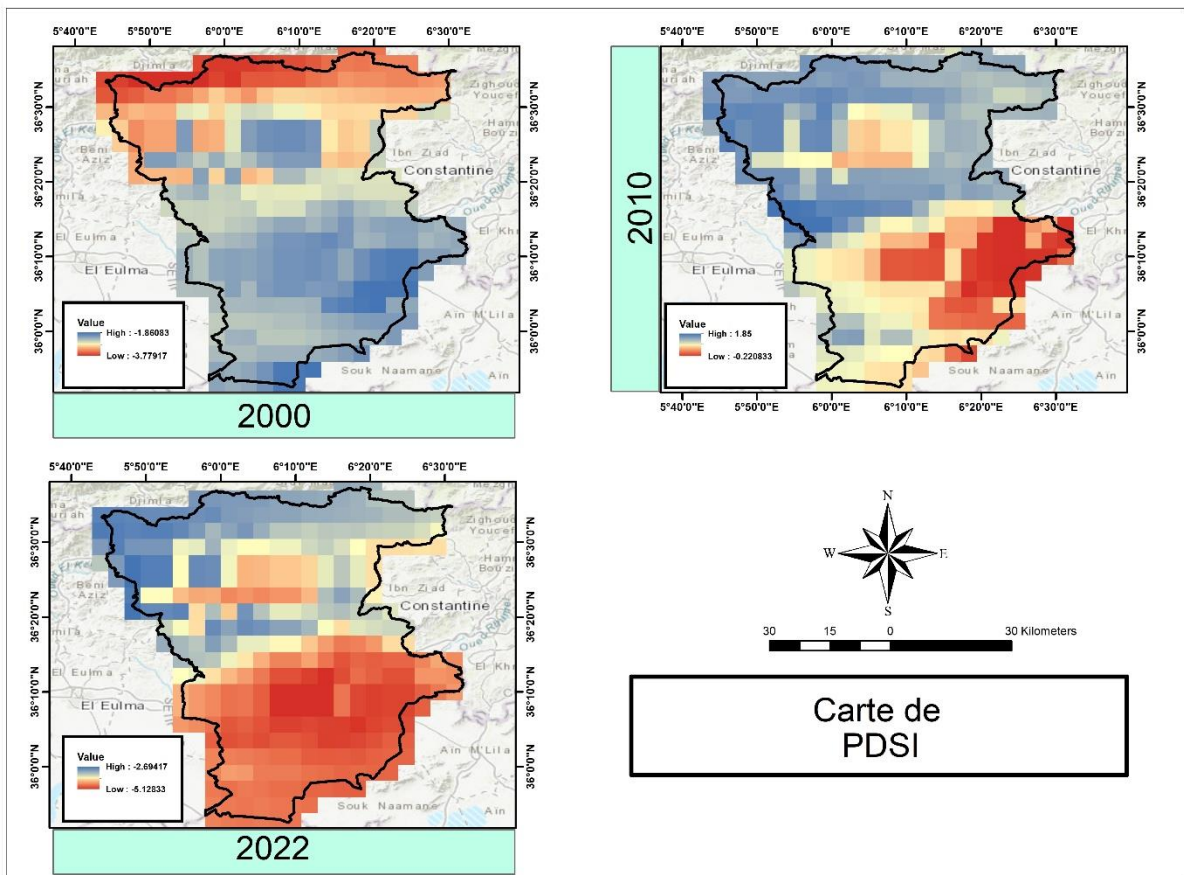


Fig. 20 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.

Nos résultats indiquent une fluctuation des conditions thermiques et hydriques entre 2000 et 2023, caractérisée par des températures plus élevées et une sécheresse accrue. Ces observations sont en accord avec les conclusions de **Zeroual et al. (2019 ; 2020)**, qui soulignent que l'augmentation projetée des températures pourrait aggraver les épisodes de sécheresse et les pénuries d'eau. De plus, il est prévu que les régions arides connaissent des changements climatiques plus rapides et plus marqués, exposant les espèces à des événements extrêmes de

sécheresse et de réchauffement, entraînant des impacts directs tels que le stress thermique et la déshydratation, ainsi que des impacts indirects sur la production primaire (Loarie *et al.*, 2009 ; Hoffmann *et al.*, 2013 ; Heffelfinger *et al.*, 2018 ; Ward, 2016).

Il est donc crucial de noter que des secteurs tels que le pastoralisme et l'agriculture pluviale sont de plus en plus soumis à une pression croissante, avec une diminution des ressources et une résilience réduite face aux changements climatiques et autres facteurs. Ceci est particulièrement préoccupant dans les régions déjà chaudes, où les impacts humains s'intensifient rapidement.

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a montré une augmentation temporelle entre 2000 et 2023 (Fig. 21, 22), avec une pente de 0,0034 par an (LM, $P = 0,001$, $R^2 = 0,38$) (Tableau 2). Toutes les valeurs de NDVI étaient positives, avec une moyenne de $0,32 \pm 0,03$. Nos résultats indiquent une augmentation significative du NDVI au fil des années, suggérant une densité végétale accrue, probablement due à l'expansion des terres agricoles dans la région.

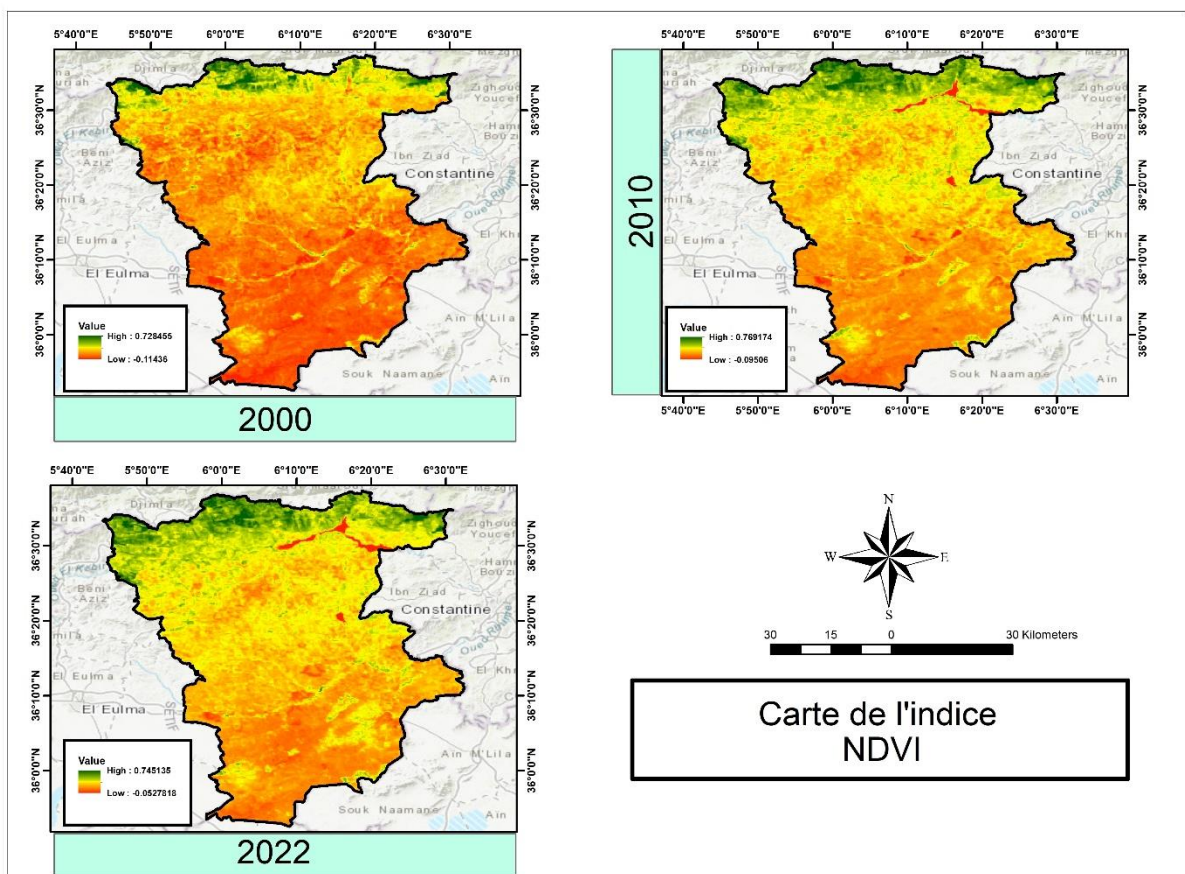


Fig. 21 : Carte montrant la région d'étude de Mila, au nord-est de l'Algérie, avec la moyenne annuelle de de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) en 2000, 2010 et 2022. Les données ont été obtenues de TerraClimate à l'aide de Google Earth Engine.

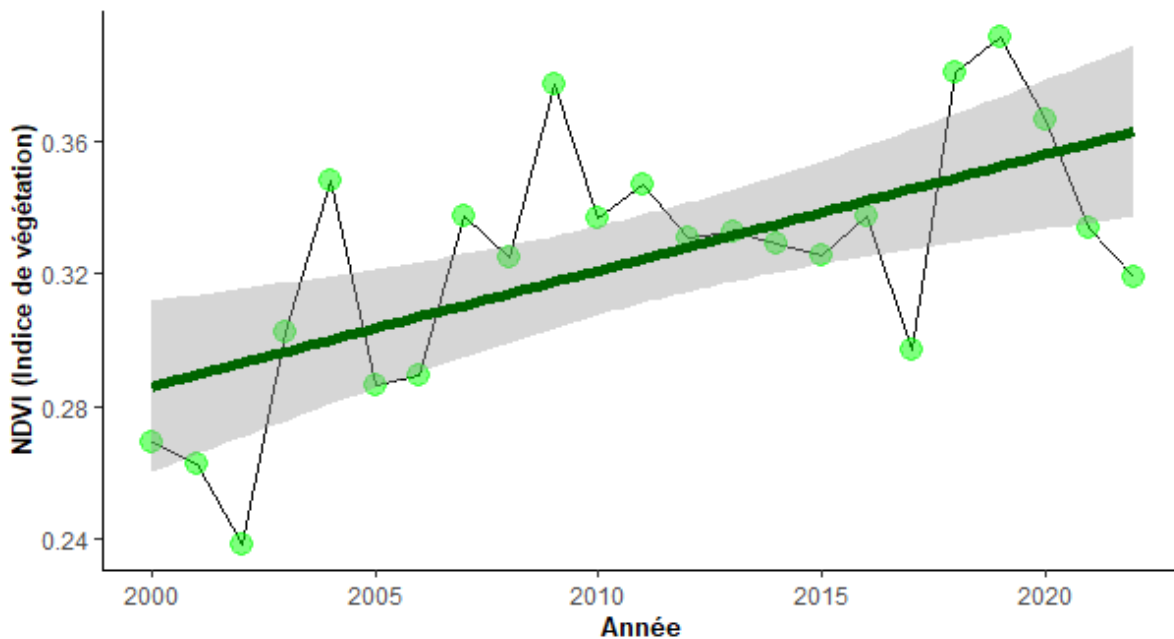


Fig. 22 : Variations des conditions climatiques enregistrées de 2000 à 2021 dans la région de Mila, Nord-est algérien. Modèle temporel de l'indice de végétation NDVI moyenne annuelle. La ligne verte est la régression linéaire et le ruban gris est l'erreur standard.

Grace à la situation stratégique de la wilaya et ses capacités naturelles, il existe dans la wilaya de Mila de vastes superficies de terres agricoles exploitées dans divers types de produits. Egalement, l'existence de grandes ressources d'eaux comme le barrage de Beni Haroun, par lesquelles, les superficies agricoles irriguées et les périmètres d'irrigation ont augmentés, ce qui a conduit à la diversité et la multiplicité des produits, comme le périmètre de Telaghma en production d'ail [3]. Les superficies de légumes irrigués au cours de la saison 2023 ont dépassé 6000 hectares, comme l'ail, les pommes de terre et les oignons, sans oublier les légumineuses sèches comme les lentilles et les pois chiches, en plus 6.442 hectares de céréales et d'arbres fruitiers (DSA, 2023). En fait, la récolte d'ail attendue au terme de l'actuelle saison agricole 2023-2024 dans la wilaya de Mila dépassera les 1,63 millions quintaux, a-t-on indiqué lundi à la direction locale des services agricoles (DSA).

En effet, la wilaya de Mila est divisée sur le plan agricole en trois régions : la région Sud, caractérisée par la production de légumes et de lait dans chacune des communes de Talghama, Ouadi Othmania, M'chira, Oued Seguin, Shalghoum El Eid et Ouled Khalouf, tandis que le centre est connu pour la production de céréales et l'élevage, enfin le Nord qui se distingue par la plantation d'arbres tels que l'olivier. En plus de l'apiculture, la culture de légumes au niveau de la

région comme la production de pomme de terre, de carottes et d'autres légumes, a connu une croissance significative ces dernières années (DSA, 2023).

En revanche, l'agriculture est étroitement liée à la sécheresse, car des conditions arides prolongées peuvent compromettre les récoltes, réduire la disponibilité en eau pour l'irrigation et entraîner des pertes économiques significatives pour les agriculteurs. C'est pour cela, il est crucial d'adapter nos pratiques agricoles à la sécheresse dans la région de Mila et généralement en Algérie, en adoptant des techniques d'agriculture spécialement conçues pour résister aux conditions arides et assurer la sécurité alimentaire. Parmi ces pratiques agricoles, on cite l'agriculture de conservation, qui inclut la rotation des cultures, le couvert végétal et le non-labour, qui aide à améliorer la structure du sol et à retenir l'humidité. Egalement, l'irrigation efficace, on utilisant des technologies telles que le goutte-à-goutte, permet une utilisation optimale de l'eau. De plus, la sélection de cultures résistantes à la sécheresse et l'utilisation de variétés locales adaptées aux conditions arides peuvent renforcer la résilience des systèmes agricoles. En résumé, la gestion intégrée des ressources en eau, combinée à des pratiques agroécologiques, contribue à maintenir la fertilité des sols et à garantir une production agricole durable même en période de faible disponibilité en eau ce qui nous aide à confronter ce problème international.

Tableau 2 : Résumé du modèle linéaire pour modéliser le changement temporel des facteurs climatique, indice de végétation et de sécheresse (2000 - 2023) dans région Mila, nord-est d l'Algérie.

Parameters	Estimate	SE	t value	p value
Tmax				
(Intercept)	-52.46656	26.11047	-2.009	0.0569
Year	0.03677	0.01298	2.832	0.0097 **
Precipitation				
(Intercept)	1828.5280	1080.2426	1.693	0.105
Year	-0.8649	0.5370	-1.611	0.122
NDVI				
(Intercept)	-6.6945076	1.9391721	-3.452	0.00239 **
Year	0.0034903	0.0009643	3.620	0.00161 **
PDSI				
(Intercept)	143.33576	138.78680	1.033	0.313
Year	-0.07179	0.06900	-1.041	0.309

Conclusion

Conclusion

La sécheresse, phénomène complexe et multifactoriel, représente un défi majeur pour notre planète. Elle résulte de l'interaction de divers facteurs, tels que le changement climatique, la variabilité des précipitations, la déforestation et la surexploitation des ressources en eau. Bien qu'aucune région du monde ne soit épargnée par ce problème mondial, les pays en développement deviennent plus cibles à cause de l'insuffisance des infrastructures et des ressources en eau.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'évolution de la variabilité climatique dans la wilaya de Mila à l'aide de données météorologiques de la période 2000-2023 ; et d'évaluer les tendances de la sécheresse dans la région, en utilisant des indices tels que le PDSI. Également, on a étudié les changements spatio-temporels de la couverture végétale dans la région étudiée. Enfin, il est nécessaire de fournir des recommandations pour une gestion durable des ressources naturelles comme l'eau face aux défis du changement climatique dans la région étudiée.

Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier certains changements climatiques durant la période d'étude dans la wilaya de Mila. Des fluctuations des conditions thermiques et hydriques ont été enregistrées entre 2000 et 2023, caractérisées par une augmentation de la température avec une tendance annuelle de $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$, une baisse de la précipitation dans la région avec une pente temporelle de $-0,86\text{ mm par an}$ et une diminution de l'indice de sécheresse standardisé (PDSI) avec une moyenne de $-0,07$, ce qui explique l'installation d'une sécheresse sévère. Cette dernière montre une variation spatio-temporelle entre le Nord en 2000, le Sud-Est en 2010 et le Sud en 2023. Également, l'évaluation de la variation spatio-temporelle de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) a montré une augmentation significative du NDVI au fil des années, suggérant une densité végétale accrue dans la région.

Parmi les solutions durables qui peuvent être adoptées, on trouve le dessalement et le traitement des eaux, afin de l'utiliser dans l'agriculture, l'industrie et d'autres secteurs. Également, les techniques d'irrigation doivent être mises à jour pour les rendre plus efficaces et économiques, et les agriculteurs doivent être encouragés à adopter des pratiques agricoles durables pour améliorer l'efficacité de l'eau dans l'agriculture locale. On outre, il est très urgent d'adopter des programmes de sensibilisation sur l'importance de la conservation de l'eau, car les communautés et les individus jouent un rôle important dans la réduction de la consommation d'eau. Enfin, il est primordial de remplacer l'agriculture pluviale par d'autres types d'agriculture

plus résilients, tels que l'agroforesterie, afin de mieux s'adapter aux conditions de sécheresse croissante dans la wilaya de Mila.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, 5(1), 1-12.
- ABOUB, R., & HAMIDA, K. (2019). *Suivi du phénomène de sécheresse d'un site semi-aride (M'Sila, Algérie) à l'aide des indices normalisés (SPI, SPEI)* (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- ACHIR, M. (2016). *Etude de l'impact des changements climatiques sur la dynamique de l'alfa (Stipa tenacissima L.) dans la région steppique de Tiaret (Algérie occidentale)* (Doctoral dissertation).
- Agoum, A. IISD. (2003). Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques Besoin réel et urgent d'une stratégie d'adaptation et de moyens pour sa mise en œuvre International. Institute for Sustainable Development, 11p. OMM., 2012. Organisation météorologique mondiale, Guide D'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, 1090, 25p.
- ANIREF., (2021). Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière, MONOGRAPHIE WILAYA DE MILA.
- Bannari, A., Morin, D., Bonn, F. & Huete, A.R. (1995). A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, 13, 95-120.
- Benssaoud, R. (2002). *Climat et santé humaine au Maghreb*. Projet régional RAB/94/g31 renforcement des capacités au Maghreb, 99 p.
- Bilan mondial 2011
- Boken V.K., Cracknell A.P. and Heathcote R.L. (2005). *Monitoring and Predicting Agricultural Drought*. Oxford: Oxford University Press.
- Bouchair, N et saadallah, D. (2014). *Etude bioécologique de la Acridiennes dans la région de Mila, Algérie*.
- Boyd, D. S., Phipps, P. C., Foody, G. M., & Walsh, R. P. D. (2002). Exploring the utility of NOAA AVHRR middle infrared reflectance to monitor the impacts of ENSO-induced drought stress on Sabah rainforests. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 5141-5147.

- Bucchignani, E., Mercogliano, P., Panitz, H. J., & Montesarchio, M. (2018). Climate change projections for the Middle East–North Africa domain with COSMO-CLM at different spatial resolutions. *Advances in Climate Change Research*, 9(1), 66-80.
- Bucheli, J., Dalhaus, T., & Finger, R. (2021). The optimal drought index for designing weather index insurance. *European Review of Agricultural Economics*, 48(3), 573-597.
- Cavus, Y., & Aksoy, H. (2020). Critical drought severity/intensity-duration-frequency curves based on precipitation deficit. *Journal of hydrology*, 584, 124312.
- Cavus, Y., Stahl, K., & Aksoy, H. (2023). Drought intensity–duration–frequency curves based on deficit in precipitation and streamflow for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(18), 3427-3445.
- CETIC., 2008. Monographie Touristique de la wilaya de Mila Yves tourte et michelbordonneau et max henry et catherine tourteLivre -le monde des végétaux.
- Chaalal O.M. (2012). Mila la wilaya. Edition, Albayazin. Alger. 209p. compartiments Eau /Sédiments de l’oued Rhumel, et barrages Hammam Grouz et Beni Haroun.
- Chapron. J et al., (2010): Le changement climatique une synthèse des interventions et discussions prononcées lors du débat sur le climat le 20 septembre 2010 à l’Académie des sciences, Jean-Loup PUGET René BLANCHET Jean SALENÇON Alain CARPENTIER.
- Chen, N., Zhang, Y., Zu, J., Zhu, J., Zhang, T., Huang, K., & Chen, Y. 2020. The compensation effects of post-drought regrowth on earlier drought loss across the tibetan plateau grasslands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 281, 107822
- Deluzarche, 2018 Futura Planète du 07/08/2018 par Céline Deluzarche.
- Derradji, T., Belksier, M. S., Bouznad, I. E., Zebsa, R., Bengusmia, D., & Guastaldi, E. 2023. Spatio-temporal drought monitoring and detection of the areas most vulnerable to drought risk in Mediterranean region, based on remote sensing data (Northeastern Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 16(1), 1.
- Dracup, J.A., Lee, K.S. & Paulson, E.G.Jr., 1980. On the definition of droughts. *Water Resources Research*, 16-2, 297-302.
- DU CLIMAT, P. D. C. (2003). Vulnérabilité des pays du Maghreb face aux changements climatiques.

- Durand Delga, M., 1969 : Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Bull. Serv. Carte géol. Algérie. 39, pp. 89-131.
- Gevaert, A. I., Veldkamp, T. I., & Ward, P. J. 2018. The effect of climate type on timescales of drought propagation in an ensemble of global hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4649-4665.
- GIEC. (2008). Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2007) Changements climatiques 2007, Résumé à l'intention des décideurs : Impacts, Adaptation et Vulnérabilité. Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat, GIEC Cambridge, 22 p.
- Guha-Sapir, D. & Below, R. & Hoyois, Ph. (2021). EM-DAT: The CRED/OFDA International Disaster Database.
- Hamlaoui L. Mesbah M. Souag-Gamane D. Medjerab A. (2013). Detecting hydroclimatic change using spatiotemporal analysis of rainfalltime series in Western Algeria. *Nat Hazards* 65, pp.1293-1311.
- Heffelfinger, L. J., Stewart, K. M., Bush, A. P., Sedinger, J. S., Darby, N. W., & Bleich, V. C. (2018). Timing of precipitation in an arid environment: Effects on population performance of a large herbivore. *Ecology and evolution*, 8(6), 3354-3366.
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166.
- Hoffmann, A. A., Chown, S. L., & Clusella-Trullas, S. (2013). Upper thermal limits in terrestrial ectotherms: how constrained are they?. *Functional Ecology*, 27(4), 934-949.
- Jean-Loup Puget, René Blanchet, Jean Salençon, Alain Carpentier (2010), Académie des sciences, Synthèse des débats sur le climat (2010) p20.
- Khaldi A., Jean-Loup Puget, René Blanchet, Jean Salençon, Alain Carpentier (2010), Académie des sciences, Synthèse des débats sur le climat (2010). (2005). Impact de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien "Monts de Tlemcen-Saida". Thèse de doctorat, Université D'ORAN, 230P.
- Klocke, N. L. and Hergert, G. W. (1990): How soil holds water, NebGuide G90-964, INAR University of Nebraska, Lincoln.

- Kogan, F.N.,(1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogenous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11-8, 1405-1419.
- Laala, A et Alatou, D. (2017) Interpolation spatiale des températures mensuelles en Algérie orientale. *Météorologie*, 98, 45-51.
- Linsley, R. K. Jr, Kohler, M. A. and Paulhus, J. (1975): *Hydrology for Engineers* (second edition), McGraw-Hill, New York, USA, 482 pp.
- Loarie, S. R., Duffy, P. B., Hamilton, H., Asner, G. P., Field, C. B., & Ackerly, D. D. (2009). The velocity of climate change. *Nature*, 462(7276), 1052-1055.
- Mahachi, N et Ikhlef, L. (2013) Analyse des dispositifs promotionnels de l'investissement direct étranger en Algérie étude de cas: Agence nationale de développement de l'investissement (ANDI) Analysis of promotional mechanisms for foreign direct investment in Algeria Case study: National agency for investment development (ANDI).
- Mehabi, S. et Zekhref, O. (2022). Impact de la sécheresse sur les ressources en eau et l'agriculture pour le haut et moyen Cheliff (cas de Ain Defla).
- Melhaoui, M et Mezrhab, A et Mimouni, J et Elwali, A. (2016) : ANALYSE ET EVALUATION DE LA SECHERESSE HYDROLOGIQUE DANS LE BASSIN DE L'OUED EL HAÏ (HAUTS PLATEAUX DU MAROC ORIENTAL). *Rev. Microbiol. Ind. San et Environn.* Vol 10, N°1, p : 175-186
- Narasimhan, R. and Srinivasan, R. (2005). Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring, *Agr. Forest Meteorol.*, 133, 69-88.
- Nath, S., Shyanti, R. K., & Nath, Y. (2021). Influence of anthropocene climate change on biodiversity loss in different ecosystems. In *Global Climate Change* (pp. 63-78). Elsevier.
- NDMC., 2006a. What is Drought? Understanding and Defining Drought. Available from.
- OMM. (2021b). Atlas de l'OMM sur la mortalité et les pertes économiques dues aux phénomènes météorologiques, climatiques et hydrologiques extrêmes, 1970-2019.
- OMM., 2006. Organisation Météorologique Mondiale, suivi de la sécheresse et alerte précoce : principes, progrès et enjeux futurs, N°1006, 28p.

- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. (Eds.). (2008). Bilan 2007 des changements climatiques, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur Rapport de synthèse GIEC (2008).
- Pachauri, R. K., & Reisinger, A. Bilan (2007) des changements climatiques, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat GIEC (2007). Pachauri, R. K., & Reisinger, A. Bilan (2007) des changements climatiques, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat GIEC (2007).
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological Drought. U.S. Weather Bureau Research Paper No. 45. 58p.
- Panu, U. S. and Sharma, T. C. (2002). Challenges in drought research: some perspectives and future directions, *Hydrol. Sci. J.*, 47 (SI): S19-S30.
- Rapport de la World Bank Group 1999
- Safar Zitoun M. (2006). Évaluation des dispositifs d'alerte précoce à la sécheresse existants à l'échelle nationale – cas de l'Algérie, expertise dans le cadre du projet SMAS/OSS.
- Safar-zitoun, M. (2019) : Plan national sécheresse Algérie lignes directrices en vue de son opérationnalisation Mohamed safar-zitoun consultant cnuclcd alger, 30 Juin 2019 page 26- 30
- Singla S. (2009). Impact du changement climatique global sur les régimes hydroclimatiques au Maroc tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements, mémoire de master 2, Parcours Recherche Eau et Environnement (R2E) Mention Biologie Géologie Agro ressources Environnement – Sciences Pour l'Environnement Département des Sciences de la Terre de L'Eau et de l'Environnement de Montpellier, p 90.
- Soukhal B. (2011). LA WILAYA DE MILA : VILLES, VILLAGES ET PROBLÉMATIQUE DE L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE, THÈSE DE DOCTORAT ES SCIENCE EN AMÉNAGEMENT DE TERRITOIRE.
- Taibi S. Meddi M. Mahé G. Assani A. (2017). Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall, *Theor Appl Climatol* 127, pp.241-257
- Tanarhte, M., De Vries, A. J., Zittis, G., & Chfadi, T. (2024). Severe droughts in North Africa: A review of drivers, impacts and management. *Earth-Science Reviews*, 104701.

- Taylor, C. M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D. J., Vischel, T., Bock, O., ... & Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544(7651), 475-478.
- Unganai L.S et Kogan F. N. (1998). "Drought monitoring and corn yield estimation in Southern Africa from AVHRR data," *Remote Sensing of Environment*, 63, pp. 219–232. used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83, 1149–1165.
- Viau, A. A., Vogt, J. V. & Beaudin, I. (2000). Comparison of a Satellite-Based and a Precipitation-Based Drought Index. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26, 580-583.
- VICENTE-SERRANO S. M., BEGUERIA S., LOPEZ-MORENO. J. I. (2010). A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index –SPEI. *Journal of Climate*. 23 (7).
- Vicente-Serrano, S. M., Quiring, S. M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., & Domínguez-Castro, F. (2020). A review of environmental droughts: Increased risk under global warming?. *Earth-Science Reviews*, 201, 102953
- Vogt, J.V. (1992). Characterizing the Spatio-temporal Variability of Surface Parameters from NOAA AVHRR Data. A case Study for Southern Mali. Commission of the European Communities - Joint Research Centre, EUR Publication no. 14637 EN, Brussels/Luxembourg. 263p.
- Vogt, J.V. (1995). The use of low-resolution satellite data for crop state monitoring. possibilities and limitations (eur 16008 en). *Agrometeorological Models: Theory and Applications in the MARS Project*, 223-240.
- Wallemacq, P. & Guha-Sapir, D. & McClean, D. & CRED, & UNISDR. (2015). *The Human Cost of Natural Disasters - A global perspective*.
- Wang, Q., Zhang, R., Qi, J., Zeng, J., Wu, J., Shui, W., ... & Li, J. (2022). An improved daily standardized precipitation index dataset for mainland China from 1961 to 2018. *Scientific Data*, 9 (1), 124.
- Ward, D. 2016. *The biology of deserts*. Oxford University Press.
- Wilhelmi, O. V., Hubbard, K. G. and Wilhite, D. A. (2002). Spatial representation of agroclimatology in a study of agricultural drought, *Int. J. Climatol.*, 22, 1399–1414, doi: 10.1002/joc.796.

- Wilhite D. et Glantz M. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, pp.11-120.
- Xingjun H. Shenglian G. Lihua X. Zhangjun L. (2014). Spatial and temporal analysis of drought using entropy-based standardized precipitation index: a case study in Poyang Lake basin, China. *Xingjun Hong & Shenglian Guo & Lih ua Xiong & Zhangjun Liu*. 4 november 2014, *Theor Appl Climatol* DOI 10.1007/s00704-014-1312-y, pp.543-556.
- Yacoubi, M., El Mourid, M., Chbouki, N., & Stockle, C. O. (1999). Typologie de la Sécheresse et recherche d'indicateurs d'alerte en climat semi-aride marocain. *Science Et Changements Planétaires/Sécheresse*, 9(4), 269–0.
- Zeroual A. Assani A. Meddi M. (2017). Combined analysis of temperature and rainfall variability as the relate to climate indices in Northern Algeria over the 1972-2013 period. *Hydrol Res* 48, pp.584-595.
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, H., Bouabdelli, S., Zeroual, S., & Alkama, R. (2020). Assessment of projected precipitations and temperatures change signals over Algeria based on regional climate model: RCA4 simulations. *Water Resources in Algeria-Part I: Assessment of Surface and Groundwater Resources*, 135-159.
- Zeroual, A., Assani, A. A., Meddi, M., & Alkama, R. (2019). Assessment of climate change in Algeria from 1951 to 2098 using the Köppen–Geiger climate classification scheme. *Climate dynamics*, 52(1-2), 227-243.
- Zouaidia H. (2006). Bilan des incendies de forêts dans l'Est Algerian : Cas de Mila, Constantine, Guelma et Souk-Ahras. En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Ecologie et Environnement : Université de Mentouri, Constantine (Algérie).

Site web:

- [1] <https://developers.google.com/earth-engine/guides/getstarted>
- [2] <https://delladata.fr/installer-logiciel-r-environnement-r-studio/>
- [3] https://interieur.gov.dz/Monographie/detail_axe.php?wilaya=43&type=potentialite