



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ziane Achour-Djelfa

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Terre et l'Univers

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en Géographie et Aménagement du Territoire

Spécialité : Aménagement Urbain

Thème :

*Estimation des eaux usées urbaines et application de
L'approche décisionnelle multicritère pour le choix d'un site de
station d'épuration
Cas d'étude : ville de Ksar Elboukhari (W. medea).*

Présenté par : ZINE Bouchra

DEVANT LE JURY :

Président : M. BOUSSAID Adel

Promoteur : M. BOUZNAD Imad-Eddine

Examineur : M. FOUFOU Atif

Année Universitaire 2022/2023

Dédicace

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie à mon paradis, à la prunelle de mes yeux, à la source de ma joie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allume mon chemin, ma moitié, maman

À celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection. À mon support qui était toujours à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, à mon prince papa.

À tous les membres de ma famille, mes frères (Ali_Lotfi_Khaled) et sœurs (Fatma_Zarima_Messaouda_Noura)

À tous mes camarades de classe et dans ma vie personnelle, à tous ceux qui ont participé à ma réussite, et à tous ceux qui m'aiment.

ZJNE Bouchra

Remerciement

*Nous remercions en premier lieu Dieu tout-puissant de nous avoir accordé
la puissance et la volonté pour terminer ce travail*

*Nous remercions mes parents à endurer toutes les difficultés pour nos
éducations et de la patience jusqu'à ce que nous sommes arrivés à cette étape*

*Nous remercions, Dr. Bouznad Imad-Eddine pour avoir dirigé ce
travail, nous lui exprimons notre reconnaissance pour sa disponibilité, son
attention, ses encouragements, ses remarques et ses conseils qui ont contribué
à l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous tenons à remercier également l'ensemble des membres du jury.
Mr. Boussaid Adel en tant que président, Mr Foufou Atif en tant
qu'examineur, pour avoir accepté de juger mon présent travail.*

*En fin toute personne qui a participé de près Ou de loi à
l'accomplissement de ce mémoire*

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	2
Chapitre I Présentation de la zone d'étude	
Introduction	6
I.1 Situation géographique.....	6
I.2 Caractéristiques naturelles	7
I.2.2 Les altitudes	10
I.2.3 La géologie.....	11
Description lithologique des formations	11
I.2.3.1 TRIAS	11
I.2.3.2 CRETACE.....	13
B - Albien et Cénomaniens inférieurs	13
C - Turonien	14
I.2.3.3 Le Quaternaire	14
B - Alluvions actuelles et récentes	14
I.2.3.4 Le Jurassique	14
I.2.4 Hydrogéologie.....	17
I.3 Etude Climatologique.....	19
I.3.1 Pluviométrie	19
I.3.2 Température maximale.....	20
I.3.3 Température Minimale.....	21
I.3.4 Diagramme Ombro-thermique	23
I.3.5 Notion du bilan d'eau	24
I.3.5.1 Bilan du Station de Ksar EL Boukhari	24
I.4 La sécheresse.....	27

I.5	Sociéonomique	33
	Conclusion.....	36

Chapitre II Matériels et méthodes

	Introduction	32
II.1	La télédétection	32
II.1.1	Définition	32
II.1.2	Image numérique	32
II.1.3	Image satellitaire.....	32
II.1.4	Les classifications et analyse	33
a.	La classification supervisée	33
b.	La classification non supervisée	33
II.1.5	Les indices	33
II.1.6	Les systèmes de télédétection	34
a.	Landsat	34
II.1.7	Les domaines d'application de la télédétection	34
a.	Cartographie	35
b.	Thématique	35
c.	Climatologie et changements globaux.....	35
II.2	Les indices de végétation	35
II.2.1	Les principaux indices de végétation.....	35
II.2.2	Les indices simples	36
a.	NDVI	36
II.3	Google Earth Engine (GEE).....	36
II.3.1	Données de télédétection	36
II.3.2	Défis du traitement du Big-Data.....	37
II.3.3	Qu'est-ce que GEE ?	37
II.4	Classifications	39

II.4.1	Machine Learning (l'apprentissage automatique)	39
II.4.2	Classification Supervisé.....	39
II.5	CART Algorithme.....	40
II.5.1	Définition CART	40
II.5.2	Applications de Classification CART dans GEE	41
II.6	Système d'information géographique(SIG)	42
II.6.1	Les grandes fonctions d'un SIG	43
II.6.2	Coupler un SIG avec un modèle de simulation	45
	Conclusion.....	48

Chapitre III Résultats et discussions

III.	Résultats et discussion.....	49
III.1.	Détection automatique intégrée des changements avec un pas de 10 ans	49
III.1.1.	Random Forest :	49
III.1.2.	Étude de l'évolution urbaine :	49
III.2.	Résultats de la demande en eau et des estimation des eaux usées par WEAP....	55
III.2.1.	Demande en eau potable :	55
III.2.2.	Débits de retour :.....	57
	Conclusion générale	64
	Références bibliographiques	
	Résumé :.....	

Liste des tableaux

Numéro de table	Titre
I.1	La description de pourcentage de pente
I.2	Les précipitations annuelles de chaque année (1989 – 2019)
I.3	La température maximale de chaque année (1989 – 2019)
I.4	La température minimale de chaque année (1989 – 2019)
I.5	Bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE de la station de Ksar El Boukhari
I.6	Les valeurs de PDSI annuels en (1989 – 2019)
I.7	Précision des tests des zones urbaines du Ksar El Boukhari
III.2	Evolution de la demande en eau dans la ville de Ksar El Boukhari en million M ³
III.3	Evolution des débits de retours des eaux usées en eau dans la ville de Ksar El Boukhari

Liste des figures

Numéro de figure	Titre
I.1	Carte de station géographique du Ksar El Boukhari
I.2	L'exposition des altitudes de la zone d'étude
I.3	Carte de pente du Ksar El Boukhari
I.4	Carte des altitudes du Ksar El Boukhari
I.5	Carte lithologique du Ksar El Boukhari
I.6	Carte de réseau hydrographique
I.7	Quantité de précipitation de chaque année en mm
I.8	Températures maximales de chaque année en °c (1989 – 2019)
I.9	Températures minimales de chaque année en °c (1989 – 2019)
I.10	Diagramme Ombro-thermique
I.11	Graphe présente le bilan d'eau (P, ETP, ETR, T)
I.12	Graphe présente le bilan d'eau (RFU, DA, EX)
I.13	Colonnes graphiques présentent le PDSI en (1989-2019)
I.14	Carte de PDSI de la région d'étude
II.1	Les indices
II.2	GEE
II.3	Collection d'images dans le GEE

II.4	L'interface du programme GEE
II.5	Les grandes fonctions d'un SIG (François Laurant 1996)
II.6	Model conceptuel WEAP
III.1	Organigramme d'évolution de la zone urbaine du Ksar El Boukhari
III.2	La zone urbaine de la ville Ksar El Boukhari en 1990
III.3	La zone urbaine de la ville Ksar El Boukhari en 2000
III.4	La zone urbaine de la ville Ksar El Boukhari en 2010
III.5	La zone urbaine de la ville Ksar El Boukhari en 2021.
III.6	Evolution de la demande en eau dans la ville de Ksar Boukhari
III.7	Evolution des débits de retours des eaux usées en eau dans la ville de Ksar El Boukhari

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

La gestion efficace des eaux usées urbaines est un défi crucial pour les collectivités urbaines à travers le monde. Les zones urbaines connaissent une croissance constante de leur population et de leurs activités industrielles, ce qui entraîne une augmentation significative de la production d'eaux usées. La ville de Ksar Elboukhari, située dans la wilaya de Médéa en Algérie, ne fait pas exception à cette tendance. La nécessité de traiter adéquatement les eaux usées devient impérative non seulement pour préserver la santé publique, mais aussi pour préserver les ressources en eau et l'environnement local.

Ce mémoire se concentre sur l'estimation des eaux usées urbaines à Ksar Elboukhari et propose l'application du modèle WEAP (Water Evaluation And Planning) pour la sélection d'un site optimal en vue de la construction d'une station d'épuration. Cette démarche s'inscrit dans le cadre d'une approche intégrée visant à résoudre le problème complexe de la gestion des eaux usées urbaines, en tenant compte de divers aspects environnementaux, sociaux, économiques et techniques.

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est une question de planification et de gestion coordonnée des terres, de l'eau et d'autres ressources naturelles en vue de leur utilisation équitable, efficace et durable [CALDER. 1999].

[HOFWEGEN and al.1999] ont défini la GIRE comme étant un processus d'attribution de fonctions à des systèmes d'eau, d'établissement de normes, de mise en vigueur (surveillance) et de gestion, comprenant la collecte de données, l'analyse des processus physiques et socioéconomiques, la considération des différents intérêts et la prise de décision par rapport à la disponibilité, l'exploitation et l'usage des ressources en eau.

Notre démarche de travail dans cette étude s'appuie sur l'utilisation du logiciel WEAP (Water Evaluation And Planning) qui a été développé par le « Stockholm Environment Institute » [SEI 2008]. WEAP est l'un des outils numériques de planification intégrée des ressources en eau, c'est une plate-forme de modélisation qui permet l'évaluation intégrée du climat d'un bassin versant, l'hydrologie, l'utilisation des terres, les infrastructures et les priorités de gestion de l'eau [YATES D. and al.2005]; son fonctionnement se base sur le principe de la comptabilité de l'équilibre de l'eau. L'utilisateur représente le système des sources d'approvisionnement

Introduction générale

(rivières, aquifères, réservoirs), le retrait, la demande en eau et les exigences de l'écosystème [HERVE L. and al. 2003].

Afin de maintenir les moyens de subsistance des populations, la gestion de l'eau doit être adaptée. Le logiciel du système d'évaluation et de planification de l'eau, WEAP a été largement utilisé pour examiner des systèmes d'eau complexes dans le secteur de la planification des ressources en eau dans le monde entier [IRENE M. JOHANNSEN. 2016].

L'Algérie, en grande partie semi-aride voire aride, connaît des précipitations annuelles allant de 200 à 400 millimètres, ce qui se traduit par des ressources en eau limitées, irrégulières et concentrées principalement dans la bande côtière (Ahmed Kettab et al., 2001). Ces contraintes liées à la disponibilité de l'eau entravent le développement du pays, car les besoins en eau ne cessent de croître. La question de l'eau en Algérie est devenue de plus en plus pressante.

Face à cette situation, quelles que soient les solutions envisagées pour remédier au déséquilibre entre l'offre et la demande d'eau, il est impératif de reconnaître la valeur économique réelle de cette ressource cruciale. Il est également essentiel de comprendre en détail les composantes du coût des services liés à l'eau (Boukhari Djebbar Y, Abida h, 2009). Cette reconnaissance de la valeur économique de l'eau est fondamentale pour guider les politiques de gestion des ressources en eau et assurer une utilisation plus efficace et durable de cette ressource limitée.

L'importance de cette étude réside dans sa capacité à contribuer significativement à l'amélioration de la qualité de vie des habitants de Ksar Elboukhari, en réduisant la pollution de l'eau et en préservant les écosystèmes aquatiques locaux. De plus, elle offre des solutions novatrices pour optimiser la localisation de la station d'épuration, en utilisant le modèle WEAP pour simuler les scénarios de gestion de l'eau, ainsi que pour évaluer les sites potentiels à l'aide d'une approche multicritère.

Pour mener à bien cette recherche, une méthodologie rigoureuse sera mise en œuvre, impliquant la collecte de données sur les eaux usées urbaines, la création et la calibration du modèle WEAP spécifique à la région de Ksar Elboukhari, et l'utilisation de méthodes multicritères pour évaluer les sites proposés, telles que l'Analytic Hierarchy Process (AHP).

Ce mémoire est structuré en plusieurs sections pour fournir une compréhension approfondie du sujet. La première section présente le contexte général de la gestion des eaux usées urbaines et

Introduction générale

ses enjeux à Ksar Elboukhari, suivie d'une revue de la littérature mettant en évidence les approches similaires adoptées dans d'autres régions. La méthodologie de recherche est ensuite détaillée, mettant en lumière les étapes et les outils utilisés pour parvenir à des conclusions significatives.

En conclusion, ce mémoire vise à proposer des recommandations éclairées pour le choix optimal d'un site de station d'épuration à Ksar Elboukhari, en utilisant une approche intégrée qui combine le modèle WEAP et l'approche multicritère. Cette étude s'inscrit dans une perspective de durabilité, d'efficacité de la gestion de l'eau, et d'amélioration de la qualité de vie des citoyens, tout en respectant les principes de préservation de l'environnement.

Chapitre I

Présentation de la zone d'étude

Introduction

Dans ce chapitre, nous commencerons par le cadre naturel du Ksar EL Boukhari. Ceci amènera à définir l'aire d'étude, la situation géographique, puis nous déterminerons dans un premier temps les données physiques naturelles tel le relief, la géologie, occupation du sol, hydrogéologie, hydrologie. Ensuite nous entamerons les paramètres climatiques (les températures, les précipitations.).

I.1 Situation géographique

la wilaya de Médéa s'étend sur une superficie de 8700 km² . La wilaya de Médéa est limitée :

- ♣ Au nord, par la wilaya de Blida ; ♣ Au sud, par la wilaya de Djelfa ;
- ♣ A l'ouest, par les wilayas d'Ain Defla et de Tissemsilt ;
- ♣ A l'est, par les wilayas de M'sila et de Bouira.

Ksar Boukhari est située dans la région nord de l'Algérie, dans le Tell, une région montagneuse qui s'étend le long de la côte méditerranéenne. La ville est nichée dans les montagnes de l'Atlas Saharien, ce qui lui confère un relief accidenté et montagneux. La proximité de la mer Méditerranée influence le climat de la région.



Figure I.1: Carte de situation géographique du Ksar EL Boukhari

I.2 Caractéristiques naturelles

I.2.1 La pente

Une juste évaluation des pentes est une information précieuse notamment pour les forestiers, les agriculteurs, les aménageurs, les gestionnaires d'espaces ou les experts en risques naturels. En facilitant l'interprétation du relief et une meilleure compréhension de la morphologie d'un massif ou d'une vallée,

Cette carte des pentes propose une représentation graphique des pentes de différents pourcentages grâce à des couches de surimpression de différentes couleurs. Chaque couleur correspond à une classe de pente.

La carte ci-dessous présente les pentes. Le pourcentage de ces pentes varie entre 0 à 40,35 % .le pourcentage le plus dominant est celui de 0 à 2,84 % qui est présenté par la couleur verte foncée .On remarque que les pentes les plus raides sont situées au bords de ce bassin .

Lorsque l'angle de la pente est égal à 45 degrés, l'élévation est égale à l'étendue. Exprimé en pourcentage, la pente de cet angle est de 100%. Lorsque la pente est proche de la verticale (90 degrés), le pourcentage de pente tend vers l'infini.

Plus la valeur de la pente est faible, plus le terrain est plat ; plus la valeur de la pente est élevée, plus le terrain est pentu. Le raster pente est calculé sous forme de pourcentage. La fonction de pente est généralement exécutée sur une grille d'altitude, comme le montrent la carte ci-dessous (**Figure I.3**) . Les pentes les plus raides sont ombrées en rouge sur cette carte de pente.

Tableau I.1: la description de pourcentage de pente

Pourcentage de pente	Description
0 – 0,5	Plat
0,5 – 2	Presque plat
2 – 5	Très légère pente
5 – 9	Légère pente
9 – 15	Pente Moyenne
15 – 30	Forte pente
30 – 45	Très forte pente

(Source :Hagerty et Kingston, 1992.)

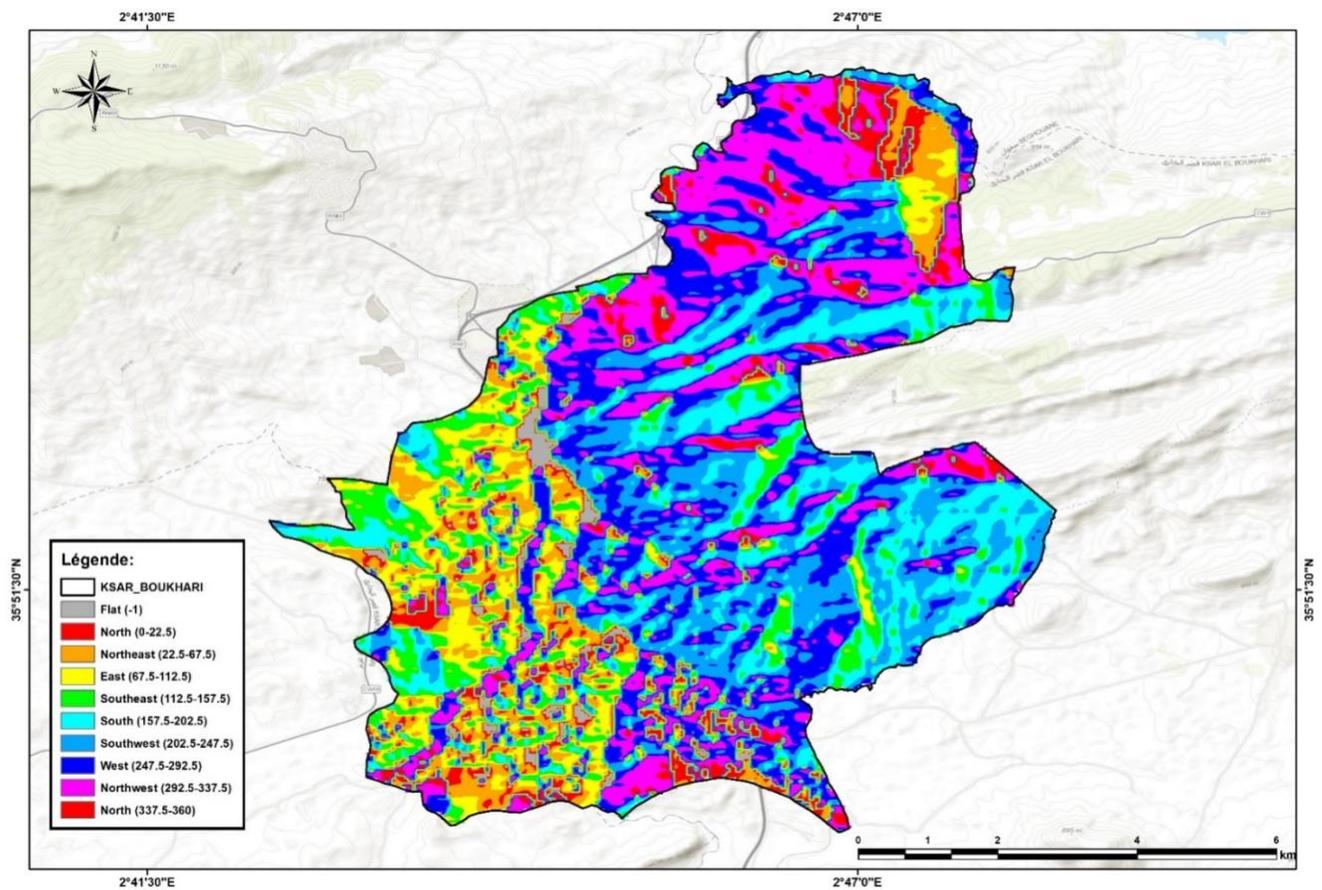


Figure I.2: L'exposition des altitudes de la zone d'étude

Dans la zone d'étude, la pente varie de 0 à 40% avec plus de gradient aux bords qu'au centre du bassin. Les plaines plates sont capables de retenir plus de précipitations et de faciliter la recharge par rapport aux zones surélevées avec des pentes plus élevées ayant un ruissellement élevé et de faibles taux d'infiltration. Sur la base de la pente, la zone d'étude a été divisée en quatre classes de pente (Figure I.2). Les zones présentant des pentes de 13,13 à 40,35% et [40,35% de celles-ci sont considérées comme «médiocres» en raison d'une pente et d'un ruissellement plus élevés. Dans la catégorie «modérée», une zone ayant une pente comprise entre 6,80 et 13,13% entraîne un ruissellement relativement élevé et une faible infiltration.

La topographie qui est tombée entre 2 et 6,80% de pente et légèrement ondulée avec un certain ruissellement est considérée comme «bonne» pour le stockage des eaux souterraines. Un terrain presque plat avec un taux d'infiltration relativement élevé et une pente de 0 à 2,84% a été considéré dans la catégorie «très bon». La majeure partie de la zone d'étude (80%) se situe sous une pente de 0 à 2,84%

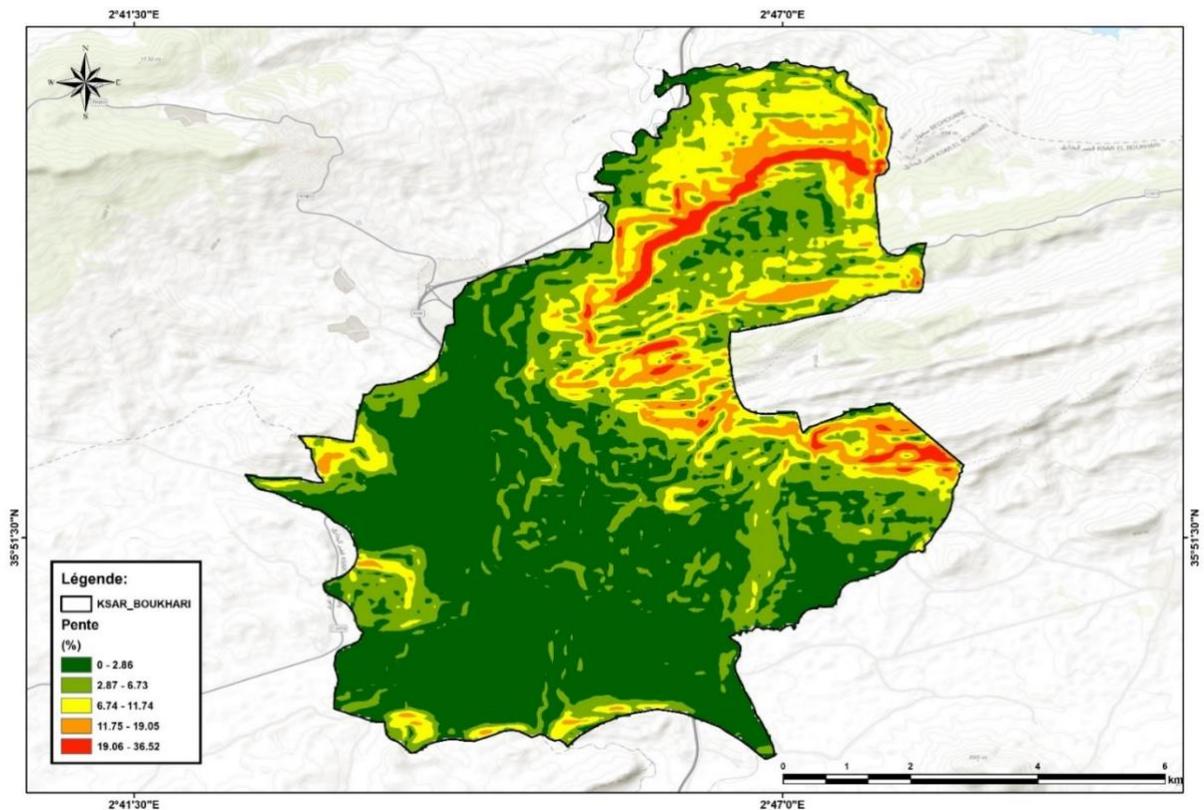


Figure I.3: Carte de pente du Ksar EL Boukhari

I.2.2 Les altitudes

Cette carte des altitudes présente l'éloignement de la surface de la terre par rapport au niveau moyen de la mer. Elle fournit également une réalité physique, l'eau s'écoule du point d'altitude le plus élevé vers le point d'altitude le plus faible.

Cette carte d'altitude incorpore plusieurs résolutions représentant les meilleures données d'altitude disponibles. Elle comprend également une collection de couches de carte dérivées de l'élévation, telles que la pente en degrés, la pente en pourcentage, l'aspect et l'ombrage. Les données d'élévation peuvent également être utilisées pour créer des profils, effectuer une analyse de bassin de vision et définir des bassins versants à l'aide d'une collection d'outils d'analyse disponible.

L'altitude minimale est de 662 m, par contre l'altitude maximale est de 1572m.

Les valeurs minimales (662 – 886) sont situées dans la partie nord est du bassin. Les valeurs de (1026 – 1191) sont localisées dans la partie sud du bassin. Les altitudes maximales sont situées dans les bords du beaucoup plus dans le sud est du bassin (**Figure I.4**)

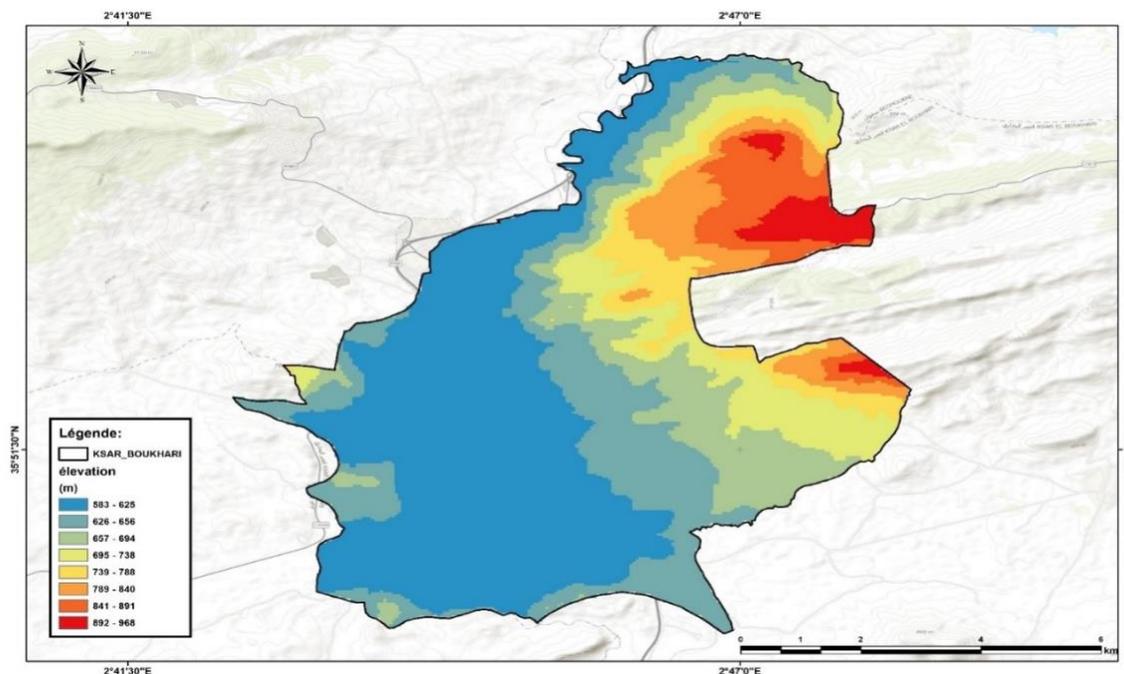


Figure I.4: Carte des altitudes du Ksar EL Boukhari(avec MNT 30 m)

I.2.3 La géologie

La géologie du Ksar EL Boukhari a été étudiée en se référant aux anciens travaux géologiques, réalisés par de nombreux géologues chercheurs tels que : M.G.BETIER et al. (1951), qui ont réalisé la carte géologique de l'Algérie au 1/500.000.00, J.M. VILA (1977) qui a réalisé la carte de Dalâa, la carte de F'Kirina, la carte d'Ain Beida au 1/50000,

Kuscer et al. (1985), qui ont réalisé la carte de Ksar EL Boukhari au 1/50000 et Dozet (1985), qui a réalisé la carte d'El Aouinet au 1/50000. La zone Nord-Est, qui fait partie de la carte de Youks- Les Bains, a été cartographiée par Kowalski (2002).

Ces travaux sur le Ksar EL Boukhari ont montré qu'il s'agit des terrains sédimentaires autochtones Nord-Aurésiens (Vila, 1980) qui se trouvent dans la partie orientale des hautes plaines constantinoises. Ces formations sont constituées de :

- Terrains anciens représentés par le Trias à faciès lagunaire, apparaissant en diapirs ;
- Très importantes assises d'âge crétacé (Aptien et Maestrichtien) formées de marnes et de calcaires ;
- Des grès et des calcaires gréseux marins formant la base du Miocène ;
- Divers recouvrements continentaux représentant le Mio-Plio-Quaternaire.

Description lithologique des formations

Deux grands ensembles représentent la lithostratigraphie du Ksar EL Boukhari :

- Le premier est constitué essentiellement par les formations crétacées et tertiaires qui affleurent dans les bordures ;
- Le second est formé, en général, par un recouvrement Mio-Plio-Quaternaire qui se dépose dans la plaine.

Ces deux ensembles constituent une série stratigraphique complète que nous allons décrire ci-après :

I.2.3.1 TRIAS

Le Trias est représenté par des masses chaotiques sans stratification (Vila, 1977), dans lesquelles divers éléments sont reconnaissables tels que des cargneules jaunâtres, des dolomies

noires, des calcaires, des gypses marneux et fibreux. Tous ces éléments sont couverts par des argilites vertes, marquant ainsi le Trias du constantinois.

I.2.3.2 CRETACE

A - Aptien-Barrémien

Il s'agit de formations de dimensions assez réduites affleurant au Nord, qui sont en contact anormal avec des pointements triasiques, au niveau de Mesloula, Djebel Belkefif, Argoub Ezzitoun et Kodiac El Hadjel. Ces formations sont représentées par des assises carbonatées qui sont recouvertes par le Miocène.

Les formations aptiennes comprennent deux faciès, le premier marno-calcaro-gréseux et le second à calcaires récifaux (Dozet, 1985). Dans le premier faciès, on rencontre des marnes jaunâtres et verdâtres, des calcaires gris à orbitolines et des grès quartzeux jaunes. On distingue la partie sous récifale qui se dispose au dessous des calcaires récifaux et la partie post-récifale qui se trouve au dessus des calcaires récifaux. Les couches de l'Aptien sous récifal ne sont nulle part entièrement exposées. Les couches de l'Aptien post récifal de Mzouzia ont une puissance de 55 m.

B - Albien et Cénomaniens inférieurs

Ces formations sont observées au Djebel Belkefif et à Mesloula avec des épaisseurs très réduites, n'excédant pas 100 m. Ces formations sont représentées par des calcaires noirs en plaquettes renfermant de nombreuses bélemnites et des intercalations de marnes argileuses gris foncées à noires (Dozet, 1985).

C - Turonien

Il est observé au Nord-Est à Douar El Machtab et il est représenté par :

- Turonien basal : est formé d'une série épaisse de marnes grises, des marnes calcaires en plaquettes, des marno-calcaires, des calcaires marneux brunâtres avec un épaisseur pouvant atteindre 270 m . Dans les marnes calcaires et les calcaires marneux, de nombreuses empreintes d'inocérames ont été déterminées. Les marnes argileuses renferment de grosses globigérines.
- Turonien moyen et supérieur: sont représentés par des marnes beiges à grises, qui alternent avec des calcaires zoogènes noduleux. (**Figure I.5**)

I.2.3.3 Le Quaternaire

A - Villafranchien

L'aspect le plus fréquemment rencontré est celui des croûtes calcaires massives et blanches. Ces formations perchées par rapport aux surfaces précédentes sont faciles à repérer, probablement karstifiées ou dissoutes. Ces faciès représentent habituellement le Villafranchien.

B - Alluvions actuelles et récentes

Ces alluvions ont une extension limitée à la vallée de Ksar EL Boukhari. Elles sont constituées de limons fins, de sables fins, de graviers et d'alluvions argileuses qui se déposent des deux cotés de l'Oued Ksar EL Boukhari.(**Figure I.5**)

I.2.3.4 Le Jurassique

La série du Jurassique supérieur constitue une mégaséquences de 6ème ordre. Elle se compose de quatre mégaséquences de 5ème ordre. Une coupe continue affleure dans la région d'Aï n Melah (Djebel Tebag).

- a – Mégaséquence J I** : Elle correspond à la série d'El Bayadh qui est essentiellement détritique à caractère deltaïque. Seule la partie terminale de cette mégaséquence affleure (20 m environ).
- b – Mégaséquence J II** : Cette Mégaséquence évolue depuis une formation carbonatée récifale vers des calcaires oolitiques puis des alternances marnes / calcaires.

c –**Mégaséquence J III** : Il s'agit d'une succession essentiellement marneuse à rares passées de bancscalcaires.

d –**Mégaséquence J IV** : C'est une Mégaséquence de nouveau carbonatée constituée de calcaireslumachelliques puis de calcaires à foraminifères benthiques en alternance avec des marnes

- un Lias basal dolomitique (30 m)

- un Lias inférieur et moyen formé de calcaires massifs, parfois oolithiques, àfaunes abondantes de Brachiopodes, Echinodermes etc.Ces formations sont épaisses de 250 à 400 m.

- le Lias supérieur essentiellement marneux est très réduit (10 à 30 m).

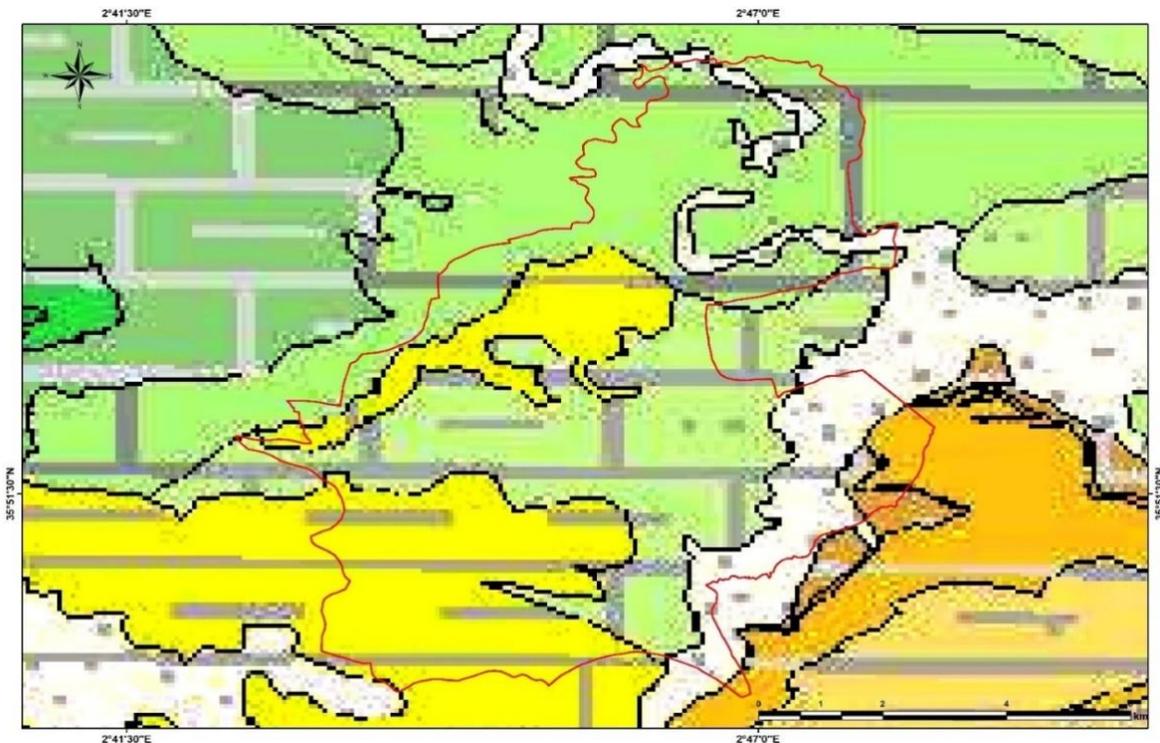


Figure I.5: Carte lithologique du Ksar EL Boukhari

I.2.4 Hydrogéologie

Cette carte hydrogéologique représente les aquifères localisés dans la région d'étude, Et qui comporte des aquifères continus et d'autres discontinus.

Ce bassin comporte un aquifère profond à grande surface et qui correspond à la couleur bleu clair sur la carte.

L'étude géologique est fondamentale, Pour la détermination des caractéristiques hydrogéologiques des aquifères, elle peut nous fournir des informations utiles sur l'aquifère telles que sa lithologie, sa structure, son épaisseur et sa localisation. Un réservoir est identifié par la présence de formations poreuses et fissurées qui sont des ensembles géologiques susceptibles d'emmagasiner de l'eau, dans notre secteur d'étude les épaisseurs des différents ensembles réservoirs ont été déterminées par l'étude géophysique.

Les niveaux aquifères raisonnablement exploitables sont les formations superficielles ou récentes du Néogène-Quaternaire, d'une part, et les grès du Crétacé inférieur d'autre part (Barrémien et Albien). Les autres formations sont certes des réservoirs potentiels ; mais leur exploration et leur exploitation sont difficiles (**Figure I.6**)

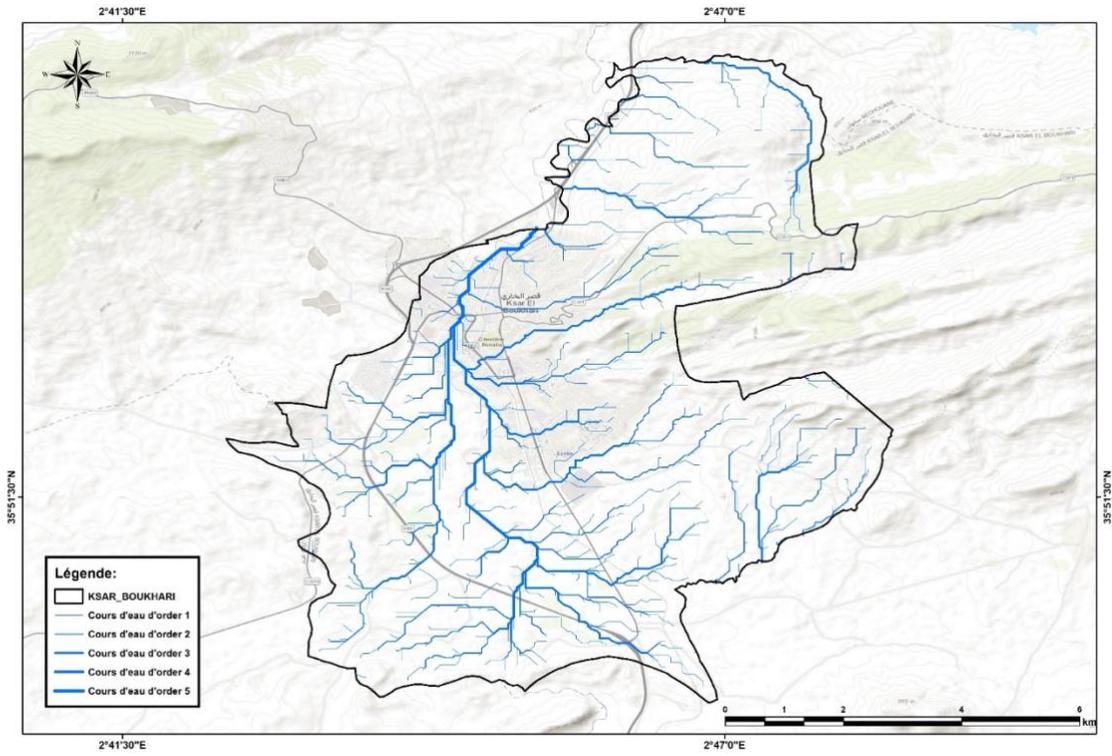


Figure I.6 :Carte du réseau hydrographique

I.3 Etude Climatologique

Plus que d'autres facteurs, le climat est le plus déterminant des ressources en eau. Les précipitations, les températures, le vent, l'humidité, l'évapotranspiration et d'autres phénomènes atmosphériques constituent le climat du bassin.

I.3.1 Pluviométrie

Dans le tableau suivant les valeurs de la précipitation moyenne au cours de la série de 30 ans (1989-2019) pour chaque station d'après les résultats de les précipitations moyenne nous avons remarqué que la valeur de précipitation la plus élevée (494 mm) , par contre la valeur de précipitation la plus faible (251 mm) est à l'année 2017 .

Tableau I.2: Les précipitations annuelles de chaque année (1989 – 2019)

Années	Précipitation annuel (mm)	Années	Précipitation annuel (mm)
1989	284	2005	309
1990	415	2006	344
1991	395	2007	339
1992	488	2008	299
1993	252	2009	488
1994	359	2010	418
1995	318	2011	494
1996	488	2012	311
1997	385	2013	392
1998	362	2014	275
1999	363	2015	437
2000	262	2016	278
2001	305	2017	251
2002	364	2018	448
2003	465	2019	426
2004	404		

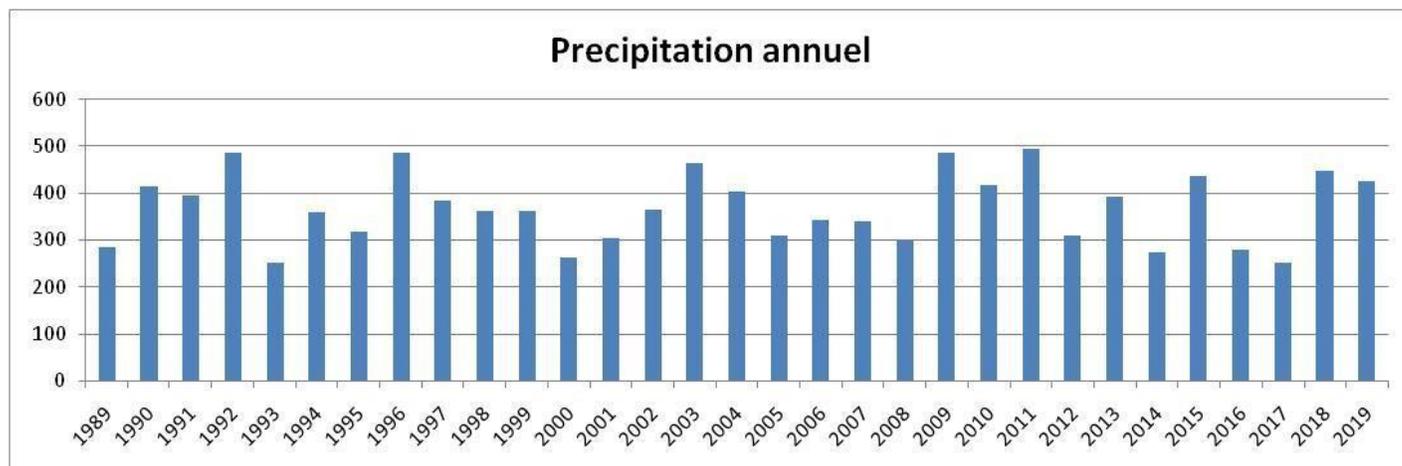


Figure I.7 : Quantité de précipitation de chaque année en mm.

I.3.2 Température maximale

La température de l'air, comme la pluviométrie, est une caractéristique importante du climat. Nous avons remarqué qu'il y a une différence légère entre les valeurs des températures maximales de région du Ksar EL Boukhari (21 – 23°C).

Tableau I.3: La température maximales de chaque année (1989 – 2019)

Années	Température maximale (°c)	2004	22.53
1989	22.78	2005	22.33
1990	22.78	2006	23.46
1991	21.57	2007	22.95
1992	21.95	2008	22.64
1993	22.35	2009	22.40
1994	23.40	2010	22.48
1995	22.65	2011	22.70
1996	22.04	2012	23.35
1997	23.04	2013	22.82
1998	22.75	2014	23.38
1999	23.40	2015	22.96
2000	23.15	2016	23.32
2001	23.30	2017	23.00
2002	22.88	2018	22.91
2003	23.20	2019	22.76

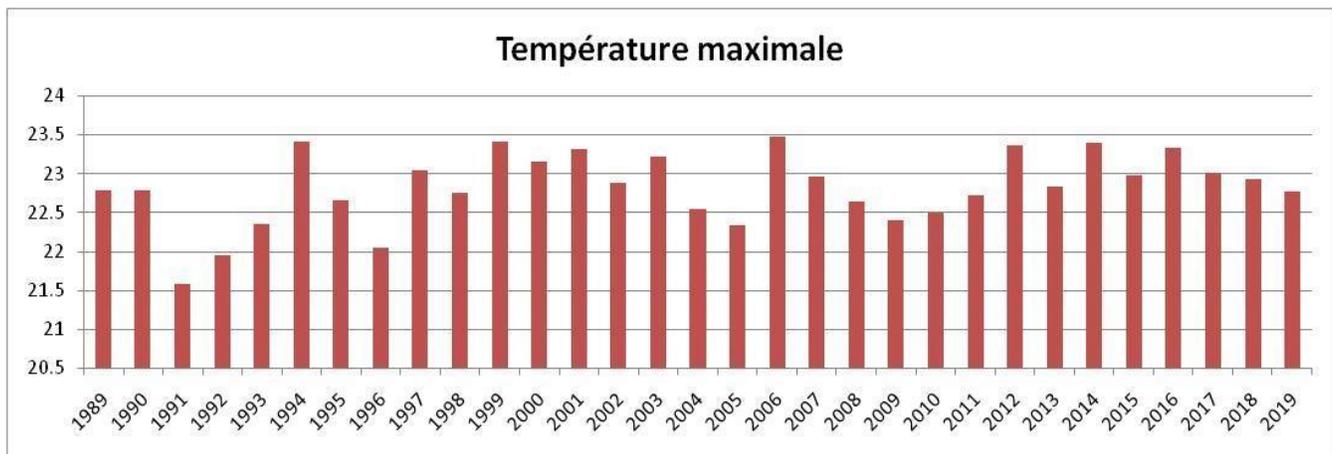


Figure I.8: Températures maximales de chaque année en °c (1989 – 2019).

I.3.3 Température Minimale

Les températures minimales des années (1989 – 2019) varie entre 8 et 10 °c , donc nous remarquons qu’il ya un léger changement de température entre cette série des années.

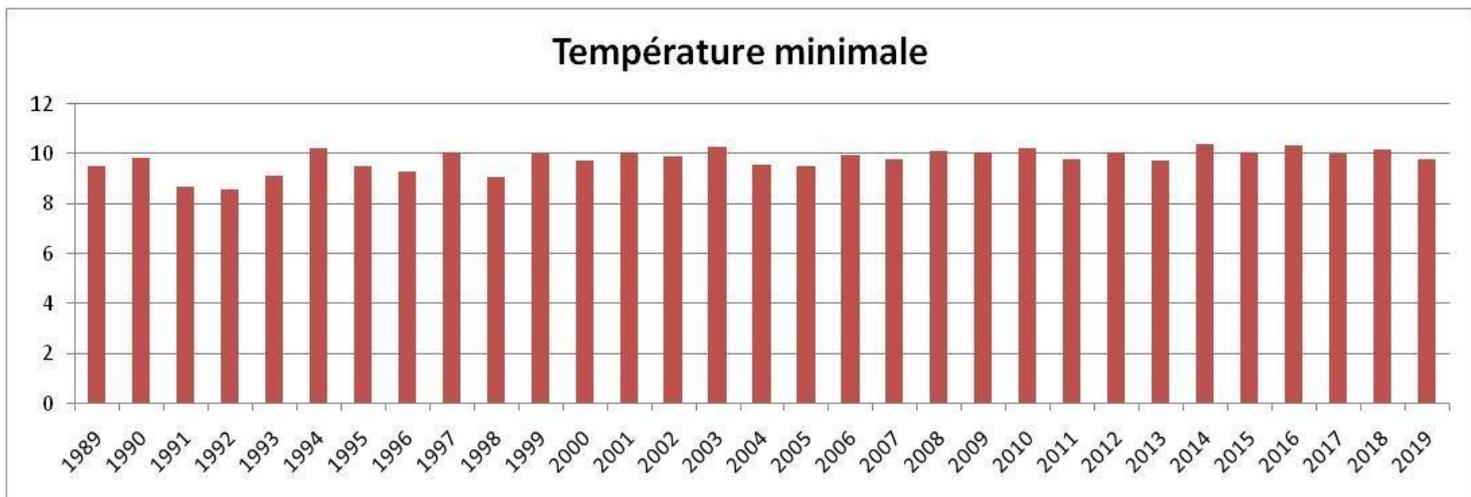


Figure I.9: les températures minimales de chaque année en °c (1989 – 2019).

Tableau I.4 La température minimale de chaque année (1989 – 2019)

Années	Température minimale (°C)	2004	9.58333333
1989	9.51	2005	9.52
1990	9.85	2006	9.95
1991	8.70	2007	9.78
1992	8.57	2008	10.10
1993	9.12	2009	10.07
1994	10.25	2010	10.23
1995	9.50	2011	9.79
1996	9.29	2012	10.09
1997	10.06	2013	9.72
1998	9.07	2014	10.39
1999	10.04	2015	10.05
2000	9.75	2016	10.34
2001	10.1	2017	10.02
2002	9.88	2018	10.18
2003	10.3	2019	9.79

I.3.4 Diagramme Ombro-thermique

Dans le but de bien préciser et de confirmer la durée des deux saisons humide et sèche, nous avons utilisé le diagramme ombro-thermique de Gaussen et Bagnouls (1953). Il permet de suivre les variations saisonnières de la réserve hydrique. Il utilise les deux principaux paramètres climatiques la température et les précipitations, représentées en abscisse par les mois de l'année, en ordonnées par les précipitations en mm et les températures moyennes en°C. Avec une échelle de $P=2T$.

L'utilisation des données pluviométriques et thermiques de la zone d'étude permet de tracer la courbe Ombro-thermique (Figure 07 , 08 et 10) qui met en évidence la durée et l'intensité de deux périodes, dans notre cas les périodes humides et sèches sont identiques :

- L'autre humide : s'étalant du mois de Septembre au mois de Mai.
- L'une de sécheresse : s'étalant entre le mois de Mai et le mois de Septembre

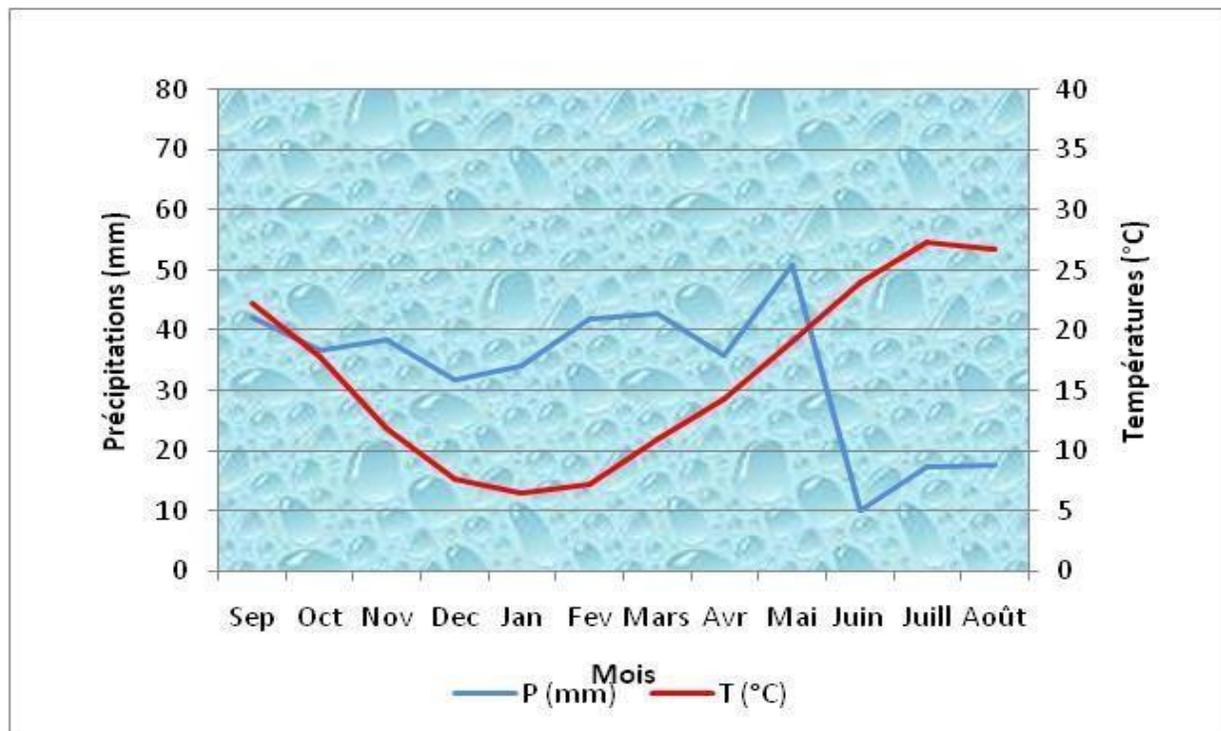


Figure I.10 : Diagramme Ombro-thermique.

I.3.5 Notion du bilan d'eau

Le bilan d'eau global correspond à une équation entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la région étudiée, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration). Pour cela, nous nous sommes basées sur les données de 11 stations dans la région des hauts plateaux pour une période d'observation de 30 ans (1989-2019).

L'excédent des précipitations sur l'évapotranspiration potentielle est emmagasiné dans le sol.

Ce qu'il augmente les réserves (RU) jusqu'à ce que ce dernier soit saturé.

I.3.5.1 Bilan du Station de Ksar EL Boukhari

Les graphes de la figure I.15 montrent que la RFU (réserve facilement utilisable) commence à ce reconstitué à partir du mois de Novembre pour atteindre une valeur maximale de l'ordre de 26 mm aux mois de Décembre, Janvier, Février et Mars. Elle diminue à partir du mois d'Avril jusqu'à ce qu'elle soit totalement épuisée au mois de Mai, l'apparition du déficit agricole (DA) à partir du mois de Mai jusqu'au mois de Octobre. L'ETP atteint son maximum au mois de juillet (177,7 mm) et son minimum au mois de janvier (10,2 mm). On peut constater que notre bilan

hydrique est déficitaire durant toute l'année sauf les mois allant du mois de Novembre jusqu'au mois de Avril (Tableau I.5). Enfin on peut constater que notre bilan hydrique est déficitaire durant toute l'année.

Tableau I.5 Bilan hydrique selon la méthode de THORNTHWAITE de la station de

Ksar EL Boukhari

	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	22.22	9.6	1.03	103.0	42.23	-60.8	-0.6	0.0	0.0	42.2	60.8	0.0
O	17.81	6.8	0.97	66.0	36.71	-29.3	-0.4	0.0	0.0	36.7	29.3	0.0
N	11.85	3.7	0.86	28.8	38.35	9.6	0.3	9.6	9.6	28.8	0.0	0.0
D	7.62	1.9	0.81	12.6	31.81	19.2	1.5	16.4	26.0	12.6	0.0	2.8
J	6.49	1.5	0.87	10.2	34.26	24.0	2.4	0.0	26.0	10.2	0.0	24.0
F	7.23	1.7	0.85	12.0	41.9	29.9	2.5	0.0	26.0	12.0	0.0	29.9
M	10.94	3.3	1.03	30.0	42.71	12.7	0.4	0.0	26.0	30.0	0.0	12.7
A	14.3	4.9	1.10	51.1	35.77	-15.3	-0.3	-15.3	10.7	51.1	0.0	0.0
M	19.09	7.6	1.21	92.9	51	-41.9	-0.5	-10.7	0.0	61.7	31.2	0.0
J	24.06	10.8	1.22	140.1	10.29	-129.8	-0.9	0.0	0.0	10.3	129.8	0.0

J	27.32	13.1	1.24	177.7	17.52	-160.2	-0.9	0.0	0.0	17.5	160.2	0.0
A	26.71	12.6	1.16	159.8	17.58	-142.2	-0.9	0.0	0.0	17.6	142.2	0.0
Annuel	16.3	77.5		884.3	400.1	-484.1				330.8	553.5	69.4

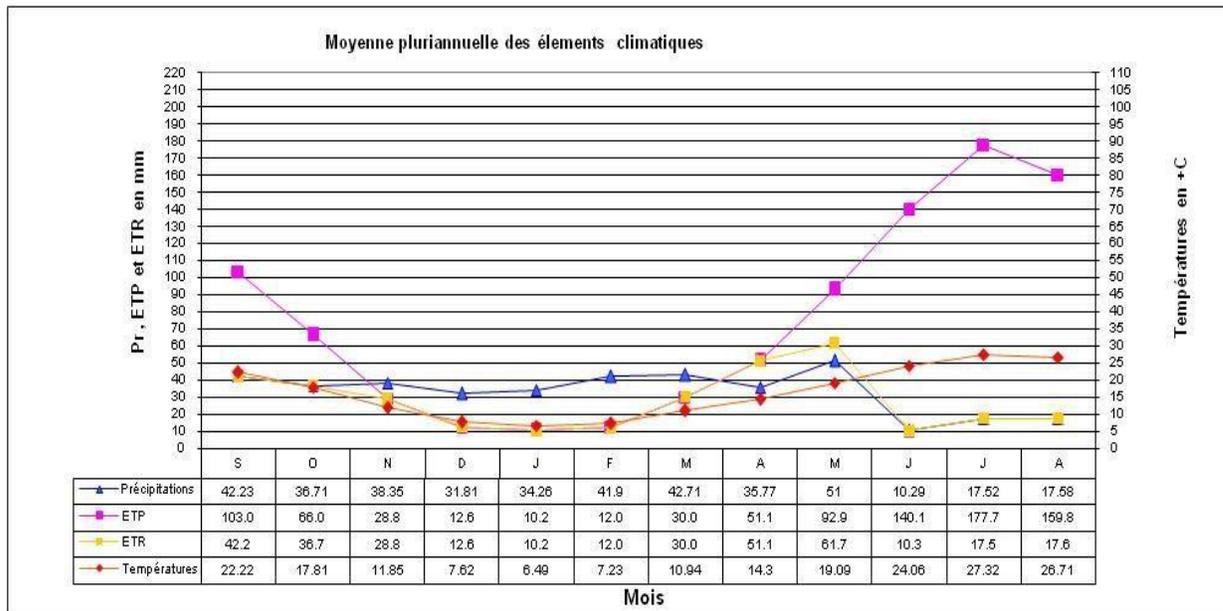


Figure I.14 Graphe présente le bilan d'eau (P , ETP , ETR , T) .

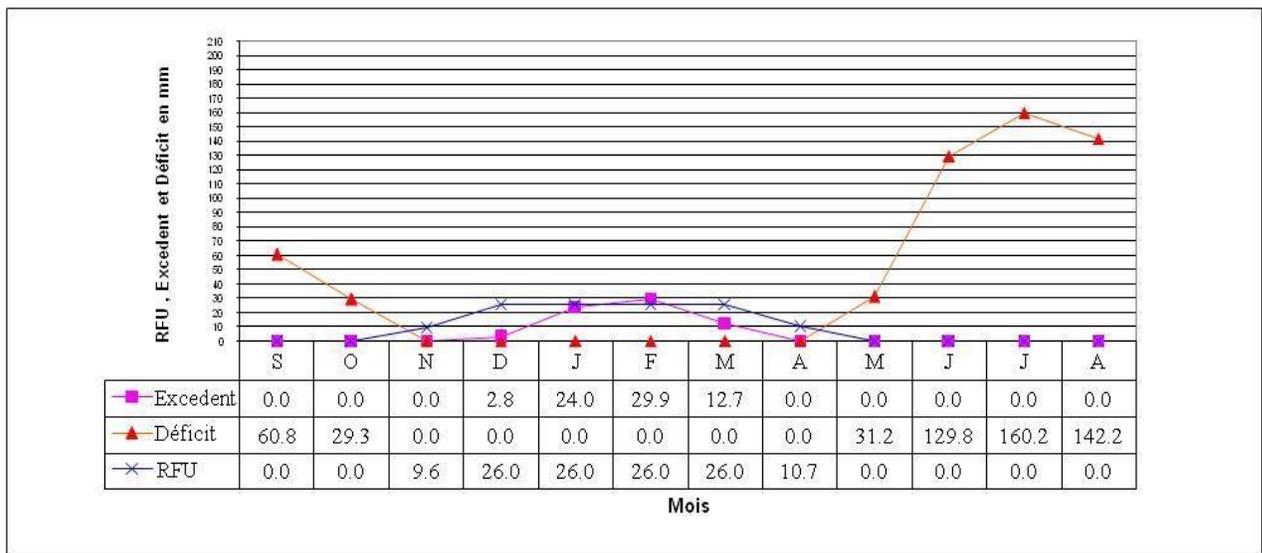


Figure I.11: graphe présente le bilan d'eau (RFU, DA, EX).

La sécheresse

L'indice de sécheresse de Palmer, parfois appelé indice de sévérité de la sécheresse de Palmer et souvent abrégé en PDSI (de l'anglais Palmer DroughtSeverity Index), est une mesure de la sécheresse fondée sur les précipitations et les températures récentes. (Palmer , 1968)

L'indice de sécheresse de Palmer est fondé sur un modèle de type « Offre et demande » appliqué à l'humidité du sol.

Si « l'offre » est facile et directement calculée, la mesure de la « demande » est plus complexe car dépendant de plusieurs facteurs -, comme la température et l'humidité du sol mais aussi de facteurs plus difficiles à calibrer comme les taux d'évapotranspiration et le taux de recharge.

Palmer a tenté de pallier ces difficultés en développant un algorithme qui les approxime en se fondant sur les données facilement disponibles : températures et précipitations.

Tableau I.6 La classification de Palmer (PDSI)

La valeur de PDSI	Classification
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	Humidité naissante
0.49 à -0.49	Presque normal
-0.5 à 0.99	Sécheresse naissante
-1.0 à -1.99	Sécheresse légère
-2.0 à -2.99	Sécheresse modérée
-3.0 à -3.99	Sécheresse sévère
-4.0 ou moins	Forte sécheresse

(Source : PALMER , 1965)

On a étudié le coefficient de PDSI pendant 30 ans entre l'année (1989 – 2019) ,

- Les années 2016 et 2017 sont les années les plus seches avec une valeur variant entre - 3.12 et 3.96 (secheresse severe) .

- Les années 1989, 1994 , 1995 , 2001 , 2002 , 2008 , 2012 , 2013 et 2014 se caractérisent par une secheresse modérée variant entre -2.0 et -2.99 .
- Les années 1993, 1997 et 2000 se caractérisent par une secheresse léger variant entre -1.0 et -1.99.
- Les années 1999, 2005 , 2007 , 2015 et 2019 indiquent un taux de PSDI normal qui varie entre 0.49 et -0.49 .
- Les années 1991 , 1992 , 2004 , 2009 et 2011 sont légèrement humides (1.0 – 1.99) .
- Enfin , l'année 1996 est une année très humide avec une valeur de 3.03 et qui représente la plus humide dans cette série .

Tableau I.7 Les valeurs de PSDI annuels en (1989 – 2019)

Année	PDSI	Année	PDSI
1989	-2,49	2005	-0,26
1990	0,30	2006	-0,69
1991	1,96	2007	-0,34
1992	1,23	2008	-2,38
1993	-1,13	2009	1,73
1994	-2,52	2010	-0,89
1995	-2,51	2011	1,06
1996	3,03	2012	-2,05
1997	-1,03	2013	-2,59
1998	-0,58	2014	-2,28
1999	-0,48	2015	-0,06
2000	-1,82	2016	-3,12
2001	-2,79	2017	-3,96
2002	-2,65	2018	-0,96
2003	2,84	2019	0,075
2004	1,53		

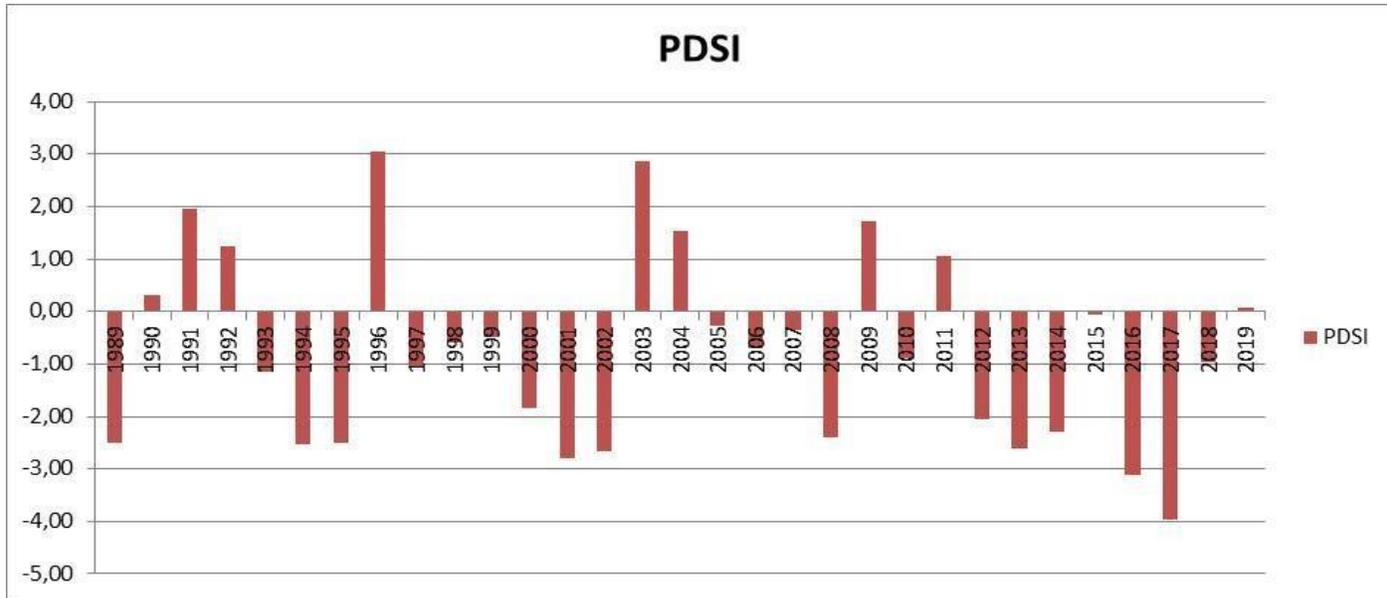


Figure I.12: Colonnes graphiques présentent le PDSI en (1989 – 2019).

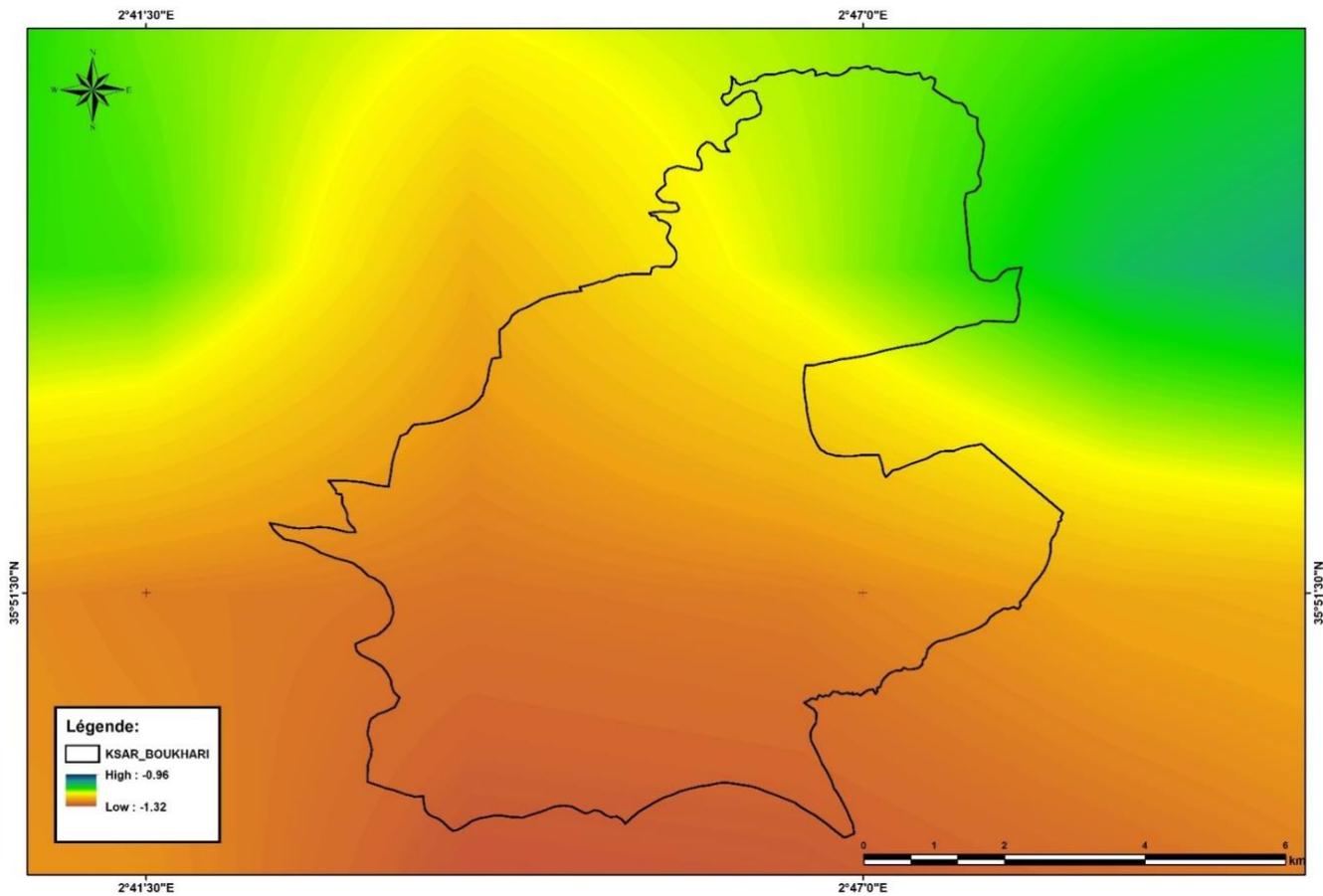


Figure I.13: Carte de PDSI de la région d'étude.

Aperçu socio-économique sur Ksar El Boukhari :

La ville de Ksar El Boukhari est riche sur le plan socio-économique et aussi avec divers aspects culturels, historiques et touristiques. Sur le plan culturel Ksar El Boukhari est le gardien de plusieurs sites historiques qui témoignent de son riche passé. Parmi eux, on trouve des édifices datant de l'époque coloniale française, ainsi que des lieux de culte traditionnels qui occupent une place centrale dans la vie quotidienne des citoyens (Figure 10).

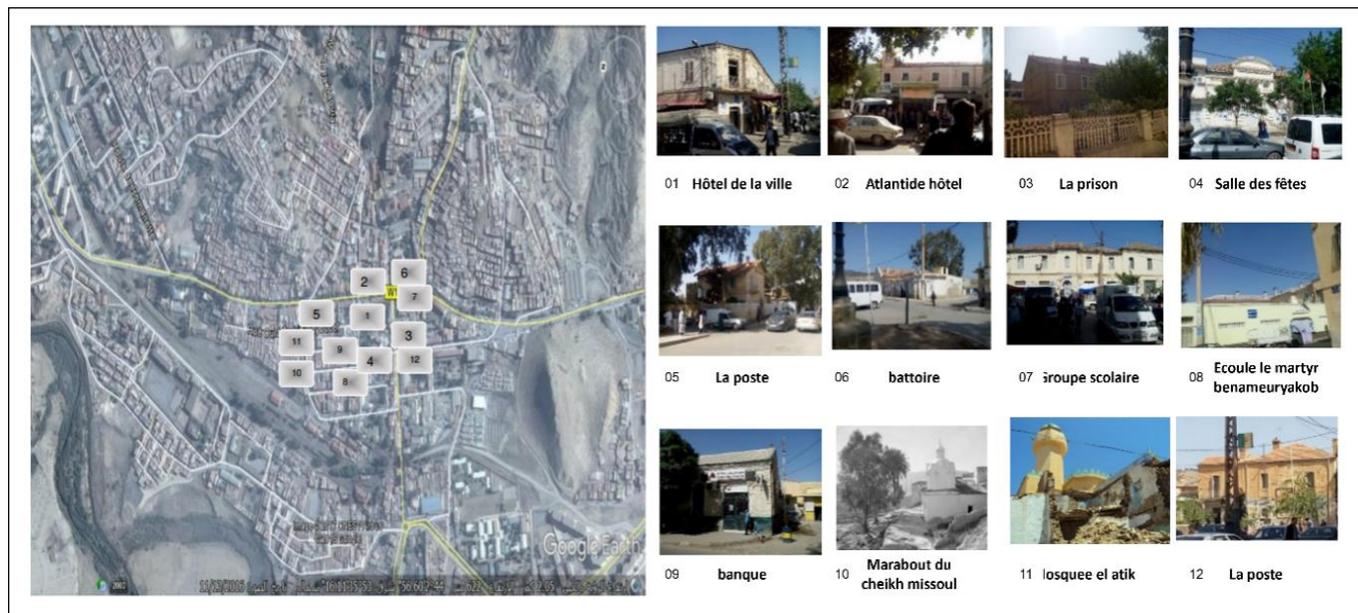


Figure 10 État des bâtiments remarquables de l'époque française dans la ville de Ksar El Boukhari.

Source: DPSB

Sur le plan touristique, bien que Ksar El Boukhari ne soit pas une destination touristique majeure, elle offre aux visiteurs un aperçu authentique de la vie quotidienne, loin des circuits touristiques traditionnels. Les voyageurs ont l'opportunité de découvrir la culture locale, de déguster une cuisine algérienne authentique et d'explorer les environs pittoresques. La ville abrite une population stable qui dépend en grande partie de l'agriculture et du commerce local pour son emploi. Les habitants travaillent dans les champs, les commerces locaux ou exercent des métiers artisanaux. L'agriculture joue un rôle central dans l'économie de Ksar El Boukhari. Les agriculteurs locaux cultivent des céréales, des olives, des amandes et d'autres produits agricoles qui alimentent la région. Bien que modeste, l'industrie locale comprend des activités artisanales telles que la production de tapis et de textiles traditionnels. Cependant, la ville n'a pas une

économie principalement industrielle néanmoins elle dispose d'infrastructures de base, notamment des routes, des commerces et des services essentiels pour la population locale. Cependant, les infrastructures industrielles sont limitées, la ville ne possède pas de zones industrielles importantes, et la majeure partie de l'activité économique est centrée sur l'agriculture et le commerce local. Il existe un total de 15 unités industrielles actives, 4 unités à l'arrêt et 2 unités qui n'avaient pas encore démarré. L'approvisionnement en énergie est principalement destiné à répondre aux besoins de la population, mais il n'y a pas de grandes installations énergétiques industrielles dans la ville. Concernant le secteur de l'éducation, Ksar El Boukhari dispose d'institutions éducatives. Des écoles primaires et secondaires sont présentes pour fournir une éducation de base aux enfants de la région. La jeunesse de Ksar El Boukhari est activement impliquée dans diverses activités sportives et culturelles. Les sports populaires incluent le football, la course à pied et la natation. Des événements et des festivals locaux permettent également aux jeunes de s'exprimer et de célébrer leur culture.

Tourisme : Bien que Ksar El Boukhari ne soit pas une destination touristique majeure, elle offre aux visiteurs un aperçu authentique de la vie quotidienne en Algérie, loin des circuits touristiques traditionnels. Les voyageurs ont l'opportunité de découvrir la culture locale, de déguster une cuisine algérienne authentique et d'explorer les environs pittoresques.

Éducation : Ksar El Boukhari dispose d'institutions éducatives qui contribuent à l'éducation de la jeunesse locale. Des écoles primaires et secondaires sont présentes pour fournir une éducation de base aux enfants de la région.

Jeunesse et Sports : La jeunesse de Ksar El Boukhari est activement impliquée dans diverses activités sportives et culturelles. Les sports populaires incluent le football, la course à pied et la natation. Des événements et des festivals locaux permettent également aux jeunes de s'exprimer et de célébrer leur culture.

Conclusion

la zone d'étude dans la wilaya de Médéa présente des caractéristiques géographiques uniques, avec un relief montagneux et une influence climatique méditerranéenne, ce qui en fait un cadre idéal de vie. Les contraintes socio-économiques sur les ressources naturelles nous ramènent vers l'obligation de réaliser des études sur la gestion des ressources en eau et l'impact de la croissance urbaine.

Chapitre II

Matériels et méthodes

Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes méthodes de traitements des images satellitaires, les formules numériques pour déterminer les caractéristiques morphométriques, la méthode de réalisation de la carte d'occupation de sol par l'utilisation et l'intégration des méthodes de l'intelligence Artificielle, de la cartographie de la recharge et le traitement des résultats par l'utilisation d'outils informatiques avancés. Ainsi la préparation des analyses des indices spectraux et leur méthode.

II.1 La télédétection**II.1.1 Définition**

La télédétection représente l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique pour analyser à distance la surface du sol, de l'océan ou l'atmosphère. Une bonne connaissance de la physique élémentaire du rayonnement est indispensable à l'interprétation des résultats de la télédétection (Nouamane, 2020).

II.1.2 Image numérique

Une image est une représentation dans le plan d'un objet réel. Les images sont omniprésentes dans notre société (dessins, peintures, photographies, etc.). Depuis quelques années, on assiste à une invasion d'images numériques, aussi appelées images "digitales" par emprunt à l'anglais ("digit" = nombre). Ces images sont constituées d'un très grand nombre de très petits points dont la couleur (ou l'intensité) est définie par des chiffres. Ces points sont appelés "pixels", dérivé de l'anglais "pictureelements" (Royer, 2015).

II.1.3 Image satellitaire

Zone assez vaste de la Terre. La particularité de cette image est qu'elle est prise par un satellite placé en orbite autour de la planète. Contrairement aux images obtenues à l'aide d'un appareil

photo, ou dessinées sur du papier, une image satellitaire est une image numérique,

traitée par outil informatique, élaborée à partir des signaux transmis par un satellite (Rimbert, 1984).

II.1.4 Les classifications et analyse

Les opérations de classification et d'analyse d'image sont utilisées pour identifier et classer numériquement des pixels sur une image. Il existe une variété d'approches prises pour faire une classification numérique. Nous allons brièvement décrire deux approches générales qui sont souvent utilisées, la classification supervisée et la classification non supervisée (Tonye et al, 2010).

a. La classification supervisée

La classification supervisée cherche à regrouper dans une même classe des données de type analogue et distinct des autres classes. La reconnaissance est effectuée à partir d'éléments étalons choisies avant le classement (Tonye et al, 2010).

b. La classification non supervisée

La classification non supervisée procède de la façon contraire. Les classes spectrales sont formées en premier, basées sur l'information numérique des données seulement. Ces classes sont ensuite associées, par un analyste, à des classes d'information utile. L'analyse peut spécifier certains paramètres relatifs à la distance entre les classes et la variance à l'intérieur même d'une classe. Le résultat final de ce processus de classification itératif peut créer des classes que l'analyste voudra combiner, ou des classes qui devraient être séparées de nouveau (Tonye et al, 2010)

II.1.5 Les indices

a- La nature numérique des données de télédétection

Se prête particulièrement bien à des opérations entre canaux. Le principe de ces opérations est d'effectuer, pour chaque pixel, des opérations mathématiques plus ou moins complexes faisant intervenir les valeurs numériques observées pour ce pixel dans les différentes bandes spectrales. Par exemple, on pourrait calculer la somme des valeurs spectrales d'une image à trois composantes: le calcul s'effectue pour chaque pixel, et le résultat est stocké dans une image numérique ayant le même nombre de pixels que les images de base. Dans certains cas, le résultat des opérations peut être négatif, ou dépasser 255, qui est la valeur maximale que peut gérer un système de traitement

d'images. On aura alors recours à des coefficients multiplicateurs et/ou à l'ajout d'une constante. Par exemple, si les 2 composantes A et B varient chacune entre 0 et 255, alors $C = (A-B) \times 0,5 + 127$ sera certainement compris entre 0 et 255. Un très grand nombre d'indices plus ou moins sophistiqués ont été développés spécifiquement pour l'analyse des données de télédétection (Bacour *et al.*, 2006).

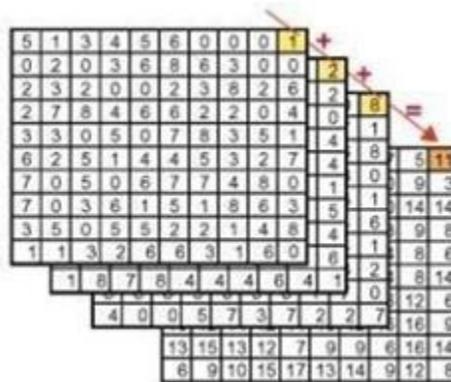


Figure II.1 Les indices

II.1.6 Les systèmes de télédétection

La collecte de données de télédétection est réalisée soit par des avions soit par des satellites. Actuellement, la télédétection évoque surtout l'acquisition de données par les satellites. Il y a une multitude de satellites en orbite qui observent les états de la surface terrestre ont va citer quelques uns.

a. Landsat

Le programme des satellites américains LANDSAT remonte à 1972, et au lancement de Landsat-1, a fait entrer la télédétection dans une phase plus opérationnelle, cette seconde génération de satellites se caractériser par un radiomètre de meilleure résolution spatiale (30m) est spectrales, dont chacun est destinée à caractériser un type de données. (De Joinville,2015)

II.1.7 Les domaines d'application de la télédétection

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une

couverture globale et très fréquemment répétée de la planète entière.

a. Cartographie

Les images satellitaires qui ont un très faible rapport "taille de l'image » Distance satellite - Terre" ont de très bonnes caractéristiques géométriques, ce qui justifie leur utilisation pour l'établissement de documents cartographiques à moyenne et petite échelle. Elles sont parfois directement utilisées comme document cartographique de base (Jaziri,2020).

b. Thématique

les images spatiales sont utilisées pour reconnaître et caractériser les éléments du paysage, et établir des documents thématiques, sous forme statistique ou cartographique pour la foresterie, l'urbanisme, l'agriculture (e.g., carte d'occupation des sols : carte de la distribution spatiale des éléments du paysage), la pêche (e.g., cartes de températures des surfaces terrestres), la géologie, l'hydrologie, la surveillance des catastrophes naturelles, etc (Jaziri,2020)

c. Climatologie et changements globaux

Les satellites dits météorologiques, par opposition aux satellites dits à haute résolution, constituent la principale source d'information pour les études globales telles que le suivi de la nébulosité, la caractérisation des différents constituants de l'atmosphère, la cartographie des températures marines, les échanges biosphère - atmosphère, etc. Ils sont caractérisés par un grand champ de vue, une faible résolution spatiale de l'ordre du kilomètre et Plus, et une relativement importante fréquence temporelle (chalon, 2020)

II.2 Les indices de végétation

II.2.1 Les principaux indices de végétation

De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés depuis maintenant une quarantaine d'années. Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. On a l'habitude de les classer en familles d'indices selon qu'ils prennent ou non en compte les facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des végétaux (indices de sécheresse), etc.

Nous présentons dans ce qui suit les Cinq familles d'indices utilisés

II.2.2 Les indices simples

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du proche et du moyen infrarouge (Bannari *et al.*, 1995).

a. NDVI

(en anglais NormalizedDifferenceVegetation Index) L'indice de végétation par différence normalisé il permet de mesurer l'intensité de vert des forêts d'une zone donnée, et indique la masse de végétation présente dans celle-ci, résultant de l'analyse de données satellitaires. (Rouse et Haas, 1973 ; Tucker, 1979) Sa formule est la suivante :

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{PIR}} - \rho_{\text{R}}) / (\rho_{\text{PIR}} + \rho_{\text{R}})$$

II.3 Google Earth Engine (GEE)

II.3.1 Données de télédétection

Accumulation de collections massives de données de télédétection depuis le sol, Plates-formes aériennes et satellites.

Aux États-Unis, ces collections comprennent le record de 40 ans de l'USGS Images satellitaires Landsat (comprenant des pétaoctets de données); la Terre de la NASA Système d'observation des données et du système d'information, ayant plusieurs données centres et plus de 7,5 pétaoctets (x 1000 téraoctets) d'images archivées et les systèmes actuels de la NASA qui enregistrent environ 5 To de télédétection données associées par jour De nouvelles technologies de capture de données telles que LiDAR sont utilisées régulièrement pour produire plusieurs pétaoctet (Begni *et al.*, 2005).

II.3.2 Défis du traitement du Big-Data

- Traiter des problèmes tels que le stockage, le traitement, la gestion, l'archivage, diffusion et analyse de grands volumes d'informations RS.
- Puissance de calcul requise pour traiter ces données massives sources. Traditionnellement, les ordinateurs de bureau avec un ou plusieurs des noyaux ont été utilisés pour traiter les données de télédétection de petites zones. En revanche, les applications de télédétection à grande ou macroscopie peuvent nécessitent des technologies HPC ; calcul sur GPU ; et parallèle, cluster, et les approches informatiques distribuées sont de plus en plus acceptées. (Puget,2016)

II.3.3 Qu'est-ce que google earth engine ?

- Plateforme basée sur le cloud pour l'analyse géospatiale
- Accédez à plus de 40 ans d'images satellite
 - Télécharger ses propres ensembles de données à intégrer aux données accessibles au public
- Appliquer une gamme d'algorithmes communs aux données
 - Exportez des images, des tableaux, des graphiques, des sorties cartographiques (Gorelick et al.,2017)

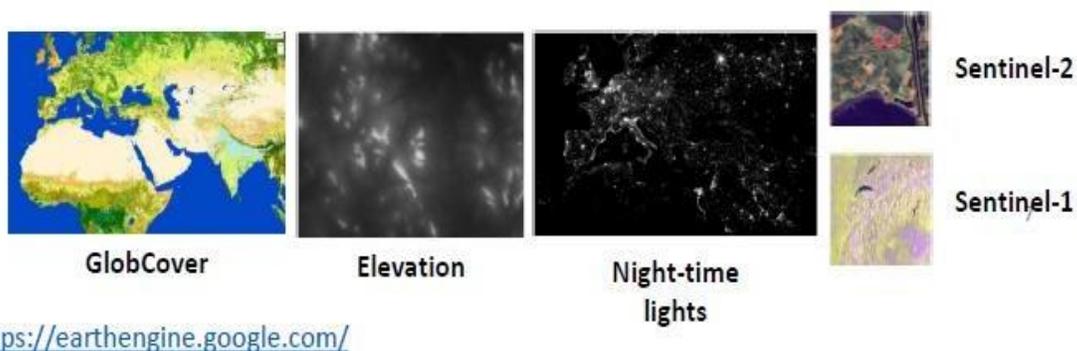


Figure II.2 GEE

II.3.3.1 Collections d'images dans google earth engine

Une collection d'images fait référence à un ensemble d'images Earth Engine. Par exemple, la collection de toutes les images Landsat 8

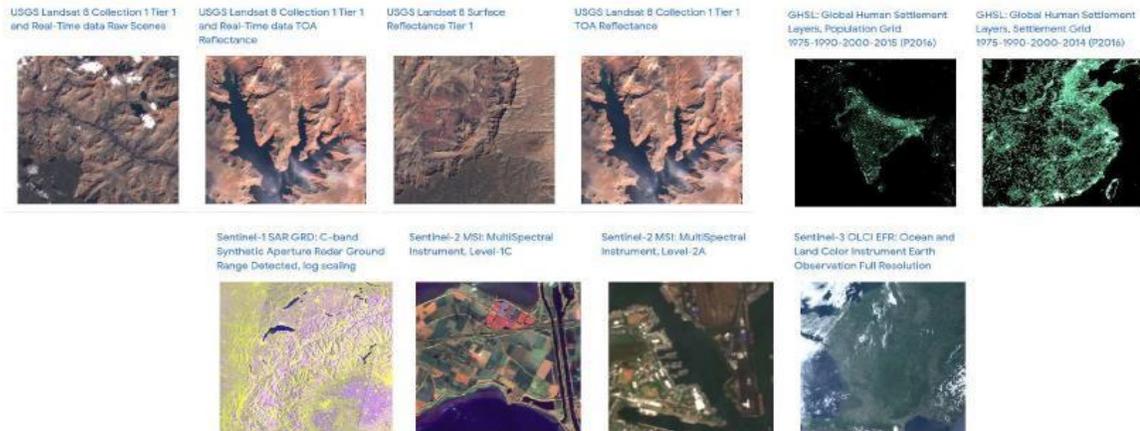


Figure II.3 Collections d'images dans le GEE

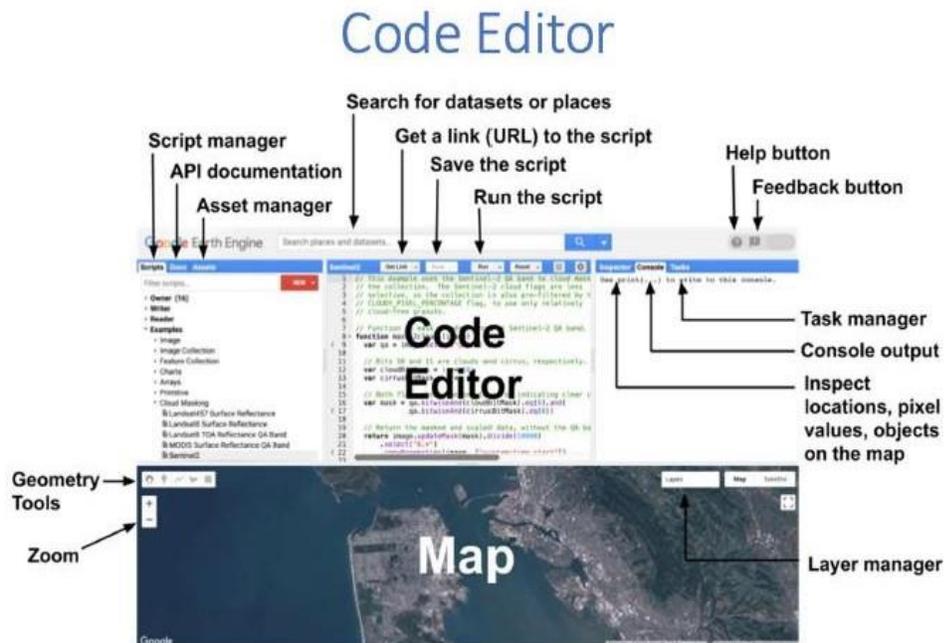


Figure II.4: L'interface du programme GEE

II.4 Classifications

II.4.1 Machine Learning (l'apprentissage automatique)

L'apprentissage automatique est loin d'être un sujet de science-fiction pour devenir l'outil commercial le plus fiable et le plus diversifié qui améliore les multiples facettes de chaque opération commerciale.

Son influence sur les performances de diverses entreprises est devenue si importante que la mise en œuvre d'algorithmes d'apprentissage automatique de premier ordre est nécessaire pour assurer la survie de nombreuses industries dans ce monde hautement concurrentiel.

La mise en œuvre du ML dans les opérations commerciales nécessite une quantité importante de ressources et constitue une étape stratégique. Par conséquent, maintenant que nous comprenons pourquoi les algorithmes d'apprentissage automatique sont importants, l'étape suivante consiste à comprendre comment vous pouvez utiliser les algorithmes ML à votre secours.

La première étape vers cela est de comprendre clairement quel est le problème commercial que vous souhaitez résoudre à l'aide de l'apprentissage automatique et de comprendre clairement la quantité de ressources et d'efforts requis dans différents types d'algorithmes d'apprentissage automatique, pour que vous puissiez choisir le meilleur algorithme parmi les nombreux qui sont sur la table. (Gregory et al.,2020)

Dans cet article, nous aborderons les principaux types d'algorithmes d'apprentissage automatique, expliquerons l'objectif de chacun d'eux et découvrirons leurs avantages.

II.4.2 Classification Supervisé

La classification supervisée par des algorithmes ML traditionnels exécutés dans Earth Engine. Ces classificateurs incluent CART, RandomForest, NaiveBayes et SVM. Le flux de travail général pour la classification est:

- Collecter des données d'entraînement.
- Assembler des fonctionnalités qui ont une propriété qui stocke l'étiquette de classe connue

et des propriétés stockant des valeurs numériques pour les prédicteurs.

- Instancier un classificateur.
- Régler ses paramètres si nécessaire.
- Former le classificateur à l'aide des données d'entraînement.
- Classer une image ou une collection d'objets.
- Estimer l'erreur de classification avec des données de validation indépendantes.

Les données d'entraînement sont une Feature-Collection avec une propriété stockant l'étiquette de classe et des propriétés stockant les variables de prédiction. Les étiquettes de classe doivent être consécutives, des entiers commençant à 0. Si nécessaire, utilisez `remap` pour convertir les valeurs de classe en entiers consécutifs. Les prédicteurs doivent être numériques.

Les données de formation et / ou de validation peuvent provenir de diverses sources. Pour collecter des données d'entraînement de manière interactive dans Earth Engine, vous pouvez utiliser les outils de dessin de géométrie (voir la section des outils de géométrie de la page Editeur de code). Vous pouvez également importer des données d'entraînement prédéfinies à partir d'un élément de table Earth Engine (voir la section Importation pour plus de détails). Obtenez un classificateur de l'un des constructeurs dans `ee.Classifier`. Entraînez le classificateur à l'aide de `classifier.train`. Classifiez une Image ou Feature Collection à l'aide de `classify`.(Richardson,2018)

II.5 Classification And Regression Trees Algorithm

II.5.1 Définition Classification And Regression Trees

Arbres de classification et de régression ou CART en abrégé est un terme introduit par Leo Breiman pour désigner les algorithmes d'arbre de décision qui peuvent être utilisés pour des problèmes de modélisation prédictive de classification ou de régression.(Breiman et al.,1984)

Classiquement, cet algorithme est appelé «arbres de décision», mais sur certaines plates-formes comme R, ils sont désignés par le terme plus moderne CART.

L'algorithme CART fournit une base pour des algorithmes importants tels que les arbres de décision en sac, la forêt aléatoire et les arbres de décision boostés.(Breiman et al.,1984)

II.5.2 Applications de Classification CART dans GEE

Arbres de classification et de régression ou CART en abrégé est un terme introduit par Leo Breiman pour désigner les algorithmes d'arbre de décision qui peuvent être utilisés pour des problèmes de modélisation prédictive de classification ou de régression.

Classiquement, cet algorithme est appelé «arbres de décision», mais sur certaines plateformes comme R, ils sont désignés par le terme plus moderne CART.

L'algorithme CART fournit une base pour des algorithmes importants tels que les arbres de décision en sac, la forêt aléatoire et les arbres de décision boostés.

Le package Classifier gère la classification supervisée par des algorithmes ML traditionnels exécutés dans Earth Engine. Ces classificateurs incluent CART, RandomForest, NaiveBayes et SVM. Le flux de travail général pour la classification est:

- Collectez des données d'entraînement. Assemblez des fonctionnalités qui ont une propriété qui stocke l'étiquette de classe connue et des propriétés stockant des valeurs numériques pour les prédicteurs.
- Instanciez un classificateur. Réglez ses paramètres si nécessaire.
- Formez le classificateur à l'aide des données d'entraînement.
- Classez une image ou une collection d'objets.
- Estimer l'erreur de classification avec des données de validation indépendantes.

Les données d'entraînement sont une Feature Collection avec une propriété stockant l'étiquette de classe et des propriétés stockant les variables de prédiction. Les étiquettes de classe doivent être consécutives, des entiers commençant à 0. Si nécessaire, utilisez remappour convertir les valeurs de classe en entiers consécutifs. Les prédicteurs doivent être numériques.

Les données de formation et / ou de validation peuvent provenir de diverses sources. Pour collecter des données d'entraînement de manière interactive dans Earth Engine, vous pouvez utiliser les outils de dessin de géométrie (voir la section des outils de géométrie de la page

Editeur de code). Vous pouvez également importer des données d'entraînement prédéfinies à partir d'un élément de table Earth Engine (voir la section Importation pour plus de détails).

Obtenez un classificateur de l'un des constructeurs dans `ee.Classifier`. Entraînez le classificateur à l'aide de `classifier.train`. Classifiez une Image ou FeatureCollection à l'aide de `classify`.

II.6 Système d'information géographique(SIG)

Le SIG par définition est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion d'espace. (Société française de photogrammétrie et télédétection, 1989). Les SIG sont aussi des moyens de présentation et d'interprétation des faits observés à la surface terrestre (Tomlin, 1990) ; le schéma suivant explique bien cette définition. On peut appeler aussi **SIG**, les systèmes capables de stocker, partager, consulter et manipuler les objets représentés sur les cartes et les plans avec leur description géométrique, ainsi que toute l'information qui leur est attachée.(Laurini et al.,1993).

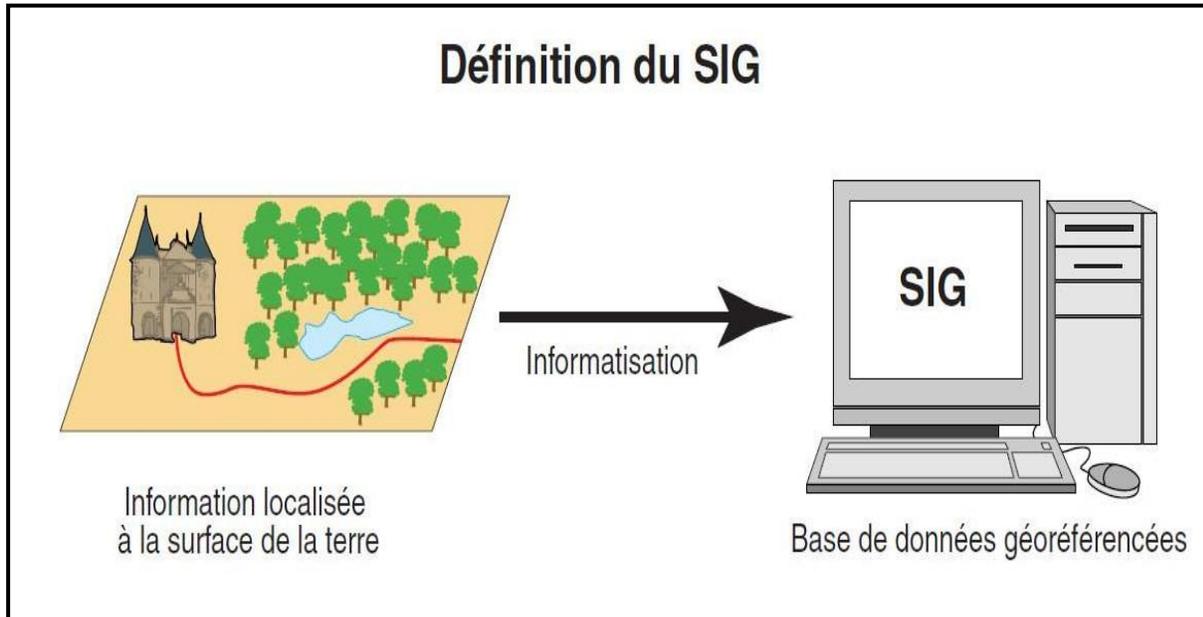


Figure II.5: Définition du SIG (Laboratoire de cartographie appliquée - Élisabeth HABERT – IRD, 2000).

II.6.1 Les grandes fonctions d'un SIG

Selon (Jemma, 1993) Les apports essentiels des SIG pour la GIRE sont :

- Le traitement systématique des problèmes.
- La résolution de complexité du système de ressource à travers un travail multidisciplinaire.
- L'optimisation de la décision sur l'usage de l'eau.

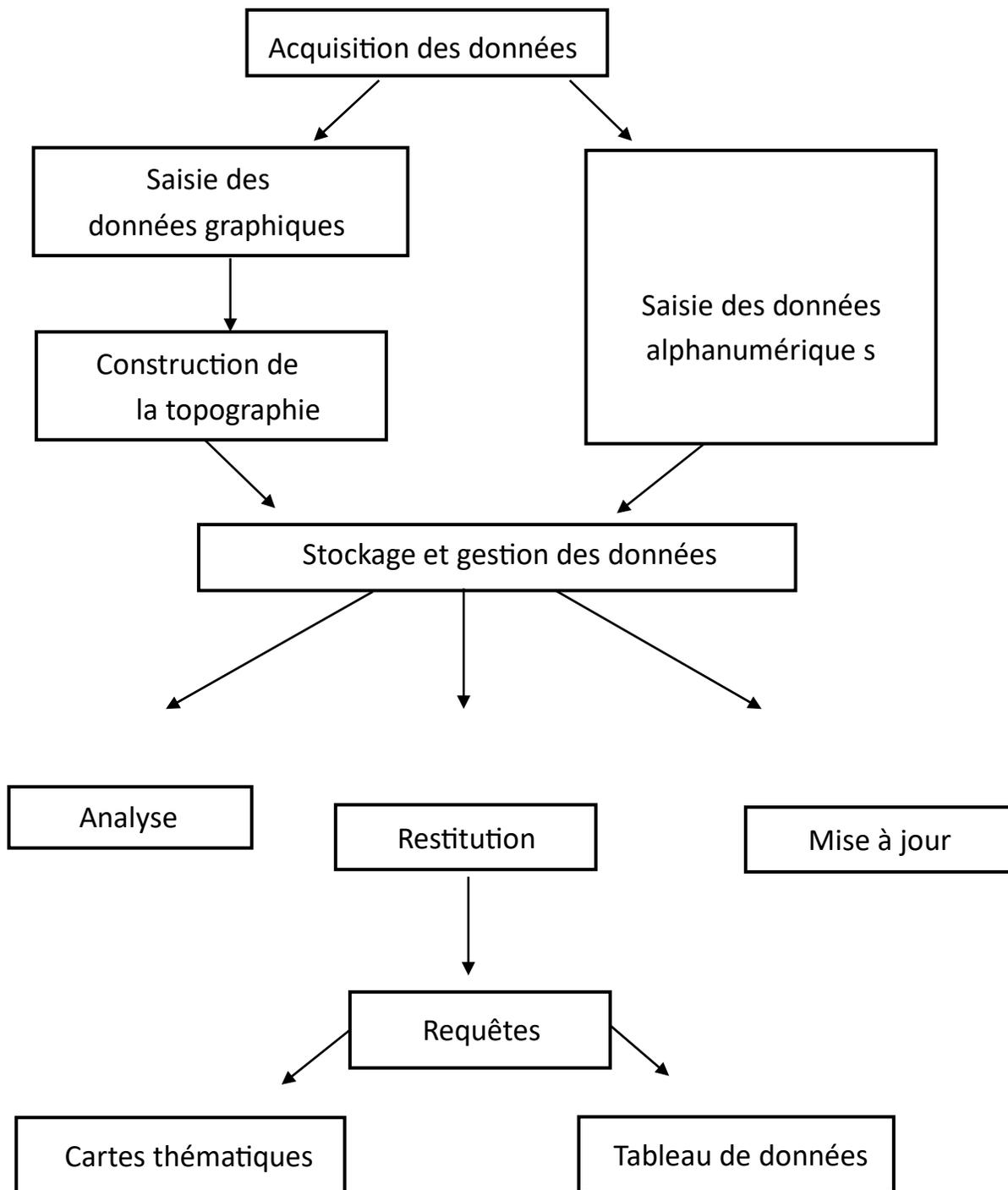


Figure II.6: Les grandes fonctions d'un SIG (François Laurent, 1996).

II.6.2 Coupler un SIG avec un modèle de simulation

Les SIG sont actuellement inadaptés à la modélisation temporelle car ils sont incapables de gérer le temps (Nyerger, 1993).

C'est pour cette raison que les chercheurs ont tenté de coupler un SIG avec des outils de simulations.

Les modèles hydrologiques sont des représentations mathématiques de l'écoulement de l'eau et de ses éléments dissouts sur/sous une partie de la surface terrestre. (Maidment, 1993).

Selon (Elkhadi, 1989) les modèles hydrologiques tentent de représenter l'évaluation dans le temps, et dans l'espace, d'un certain nombre de composantes qui contrôlent l'écoulement, telles que le climat, le sol ou la végétation.

Le choix du logiciel utilisé dans cette étude est basé sur la disponibilité, l'accessibilité et la flexibilité des paramètres qui le composent et qui permettent l'exploitation d'un large éventail de bases de données collectées.

II.7 Description de WEAP

Le modèle WEAP (Water Evaluation and Planning System) est un outil de simulation des ressources en eaux de surface et souterraines basé sur les principes de comptabilité du bilan hydrique, créé par le « Stockholm Environment Institute » (SEI, en 2005). Il peut tester d'autres ensembles de conditions pour l'offre et la demande en eau. WEAP est un logiciel qui utilise une approche intégrée de la planification des ressources en eau. Elle a connu une série d'évolutions au cours de ses 20 années. WEAP tente de combler le fossé entre la gestion de l'eau et l'hydrologie du bassin et nécessite qu'un modèle de ressources en eau intégré et adéquat soit pratique, facile à utiliser, abordable et facilement accessible à la communauté. L'étendue des ressources en eau. Il fournit également des fonctionnalités avancées qui permettent un accès rapide à d'autres modèles et logiciels, tels que MODFLOW, Excel, etc. Les modèles SIG et WEAP peuvent également être utilisés pour plusieurs raisons, comme la vulnérabilité à des activités socio-économiques intenses, qui dépendent des ressources en eau (agriculture, élevage, industrie, tourisme, etc.) et disponibilité des données (Ayed et al., 2022).

La flexibilité de l'outil pour s'adapter à différents niveaux de disponibilité des données et son

interface graphique conviviale en font un outil approprié pour une utilisation dans la vallée du ksar El Boukhari, où les données peuvent être rares et les conflits entre les différents utilisateurs de l'eau sont nombreux.

II.7.1 Modèle conceptuel

La méthodologie adoptée s'est basée principalement sur la construction d'une base de données cartographiques, climatiques et physiques (B.D.) couvrant la zone d'étude. La période de simulation couvre 2015 et 2020 avec un pas de temps journalier.

Dans un deuxième temps, un modèle conceptuel du système de mobilisation des eaux souterraines est développé à l'aide du logiciel « Water Evaluation and Planning » (WEAP). Le système étudié comprend 3 sites de demande en eau potable dirigés par les Eaux Algériennes.

La troisième étape consistait à établir des relations entre les nœuds du modèle conceptuel avec la base de données. Un test d'étalonnage du modèle constituait la quatrième étape de la méthodologie. Dans la dernière étape, les résultats réels de l'exploitation et de la gestion des barrages et les résultats du modèle de simulation sont comparés pour caractériser les performances du modèle, évaluer les apports d'eau et caractériser la gestion actuelle.

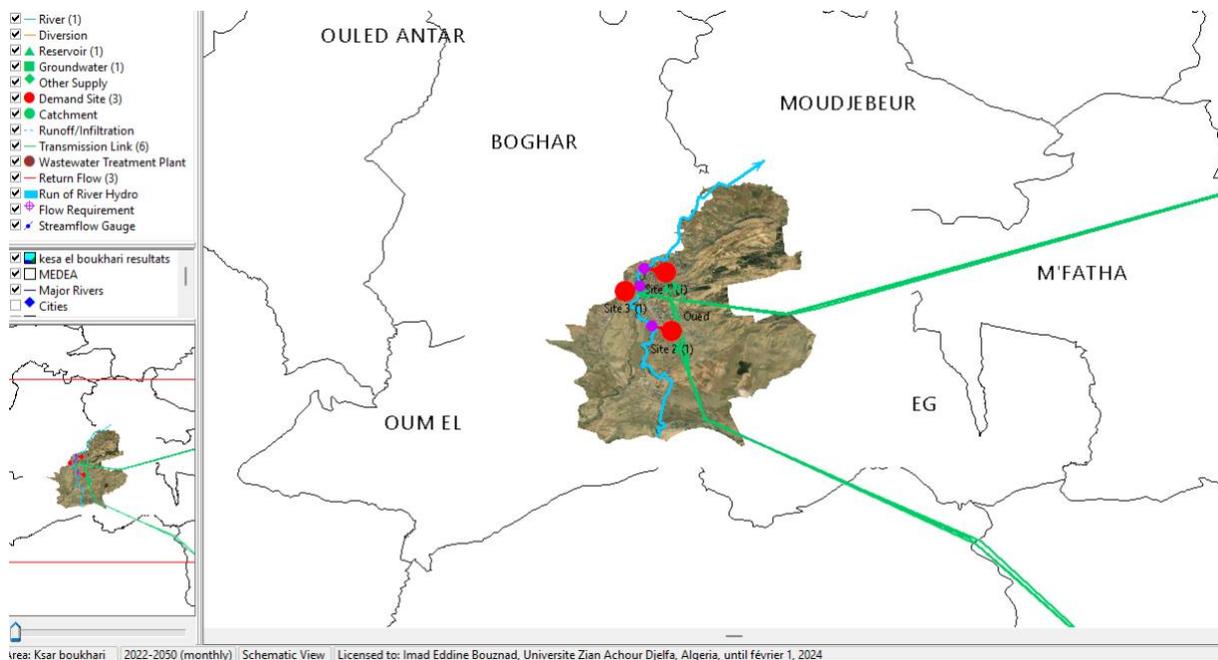


Figure II.7: model conceptuel WEAP

II.7.2. Alternatives de gestion et analyse de scénarios

II.7.2.1. Scénario de référence

Un scénario de référence est établi à partir du compte actuel, dans lequel toutes les données de base sont introduites, pour simuler la même évolution du système sans intervention. Le scénario de référence couvre la période 2020-2050, il traduit une projection des tendances courantes sans changements majeurs ; il sert comme point de comparaison pour les autres Scénarios dans lesquels des changements de données du système peuvent être réalisés. Les dotations journalières introduites pour ce scénario sont celles utilisées par les institutions officielles des services hydrauliques de la wilaya de Medea. les projections des tendances de la population sont modifiées avec le taux d'accroissement actuel de 1.6 pendant la période de projection, Les consommations annuelles d'eau sont les mêmes que celles du compte actuel et les pertes dues aux fuites d'eau sont estimées à plus de 40%.

L'année 2020 a été choisie comme référence pour toutes informations sur le système : sites de demandes, données d'approvisionnement, consommation, liaisons et transmission (Fig. II.13). Les informations économiques, démographiques et d'utilisation de l'eau sont utilisées pour construire des scénarii alternatifs qui examinent la façon dont la consommation totale et désagrégée de l'eau évolue au fil du temps. Ces scénarii de demande sont calculés dans le WEAP et appliqués de façon déterministe à un algorithme d'affectation basé sur un programme linéaire. L'analyse de la demande est le point de départ pour conduire une analyse intégrée de la planification de l'eau, étant donné que tous les calculs d'approvisionnement et de ressource dans le WEAP sont menés par la routine d'optimisation qui détermine la livraison finale à chaque nœud de demande, selon les priorités spécifiées par l'utilisateur.

Conclusion

Enfin, nous utilisons différents scénarios pour évaluer l'impact des changements sur la gestion des

ressources en eau. Cela comprend un scénario de référence représentant les tendances actuelles, ainsi que des scénarios alternatifs qui examinent les variations de la demande en eau au fil du temps.

Chapitre III

Résultats et discussions

III. Résultats et discussion

III.1. Détection automatique intégrée des changements avec un pas de 10 ans

Avant de réaliser cette cartographie, le classement par matrice de confusion (tableau 1) illustre les matrices de confusion pour les années 1990, 2000, 2010 et 2020.

L'utilisation de la télédétection et de l'analyse de forêt aléatoire (Random Forest) pour étudier l'évolution urbaine est devenue une approche puissante dans le domaine de la recherche en géographie, en urbanisme et en sciences de l'environnement. Cette combinaison de technologies offre des moyens novateurs pour surveiller et analyser les changements urbains au fil du temps. Voici un aperçu de l'application de la télédétection et de la Random Forest dans l'étude de l'évolution urbaine :

- La télédétection consiste à collecter des informations sur la surface terrestre à l'aide de capteurs montés sur des satellites, des avions ou des drones.
- Les images satellites à haute résolution spatiale sont particulièrement utiles pour surveiller les zones urbaines en fournissant des données visuelles détaillées sur l'utilisation des terres et les caractéristiques du paysage urbain.

III.1.1. Random Forest :

Random Forest est un algorithme d'apprentissage automatique utilisé pour la classification et la prédiction. Il est particulièrement adapté à l'analyse de données complexes, telles que les images satellitaires, car il peut gérer de multiples variables explicatives et capturer des relations non linéaires entre les caractéristiques. Random Forest est souvent utilisé pour la classification des types de couverture terrestre, y compris les zones urbaines.

III.1.2. Étude de l'évolution urbaine :

Pour étudier l'évolution urbaine, des séries temporelles d'images satellites peuvent être utilisées pour suivre les changements dans l'utilisation des terres au fil du temps. L'analyse de forêt aléatoire peut être appliquée pour classer les images dans différentes catégories telles que zones urbaines, zones agricoles, zones naturelles, etc. En comparant les classifications au fil du temps, il est possible de quantifier les changements urbains, tels que l'expansion des zones urbaines, la densification, la perte de terres agricoles, etc. L'approche de télédétection et de Random Forest permet une analyse objective et reproductible de l'évolution urbaine. Elle offre une grande

précision spatiale et temporelle, permettant de détecter même de petits changements dans le paysage urbain. Elle peut être utilisée pour évaluer l'impact des politiques d'urbanisation et de développement urbain sur l'environnement.

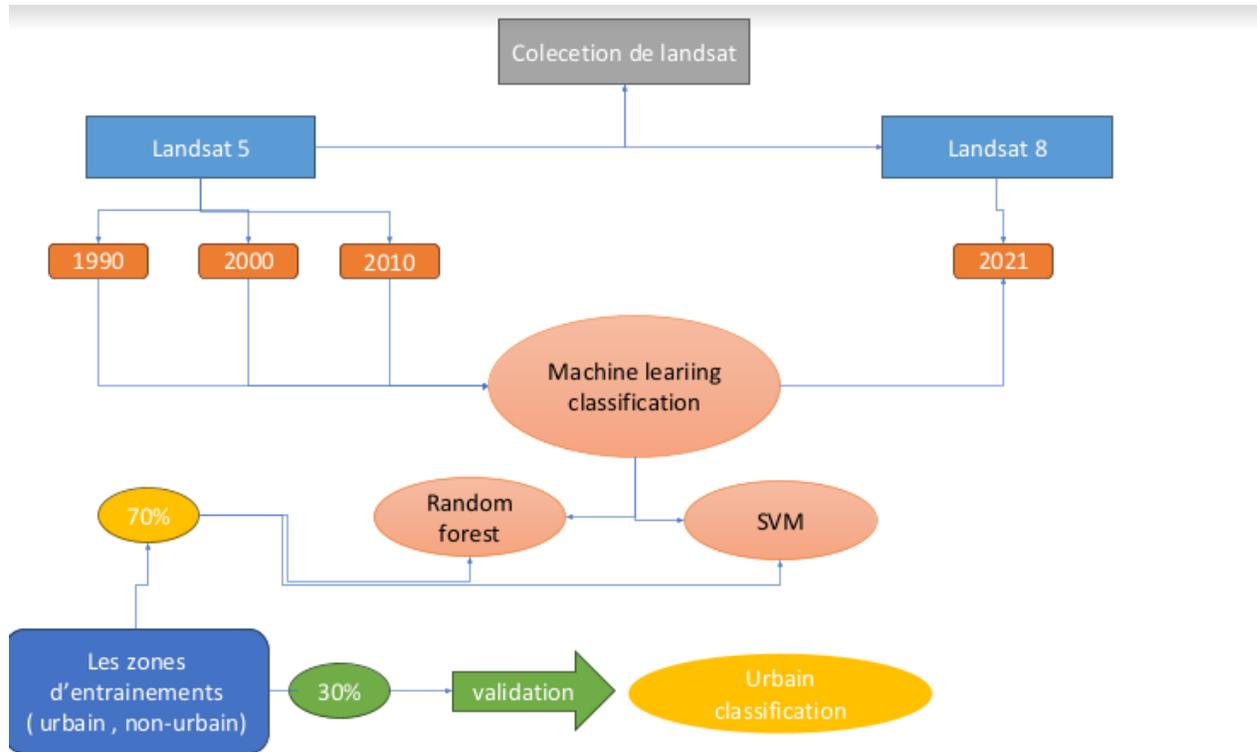


Figure III.1 : organigramme de l'évolution de la zone urbaine de Ksar Boukhari

Tableau III.1 : précision des tests des zones urbaines du Ksar Boukhari

date	Trainig accuracy	Testing accuracy
1990	0,92854	0,91
2000	0,93657	0,9584
2010	0,873584	0,90256
2021	0,96648	0,97854

Des informations sur les pourcentages d'occupation de chaque classe par rapport à la surface globale peuvent être extraites des matrices d'échange ou de confusion. Les cartes suivantes montrent l'occupation du sol à différentes dates.

L'analyse de l'évolution de la zone urbaine de Ksar Boukhari entre 1990, 2000, 2010 et 2021

révèle une tendance marquée à la croissance urbaine au fil des décennies. En 1990, la ville était principalement concentrée autour de son noyau historique, avec des quartiers résidentiels dispersés. Cependant, au cours des deux décennies suivantes, une expansion significative s'est produite. En 2000, on a observé une augmentation de la densité de la population et une extension des zones urbaines vers les zones périphériques.

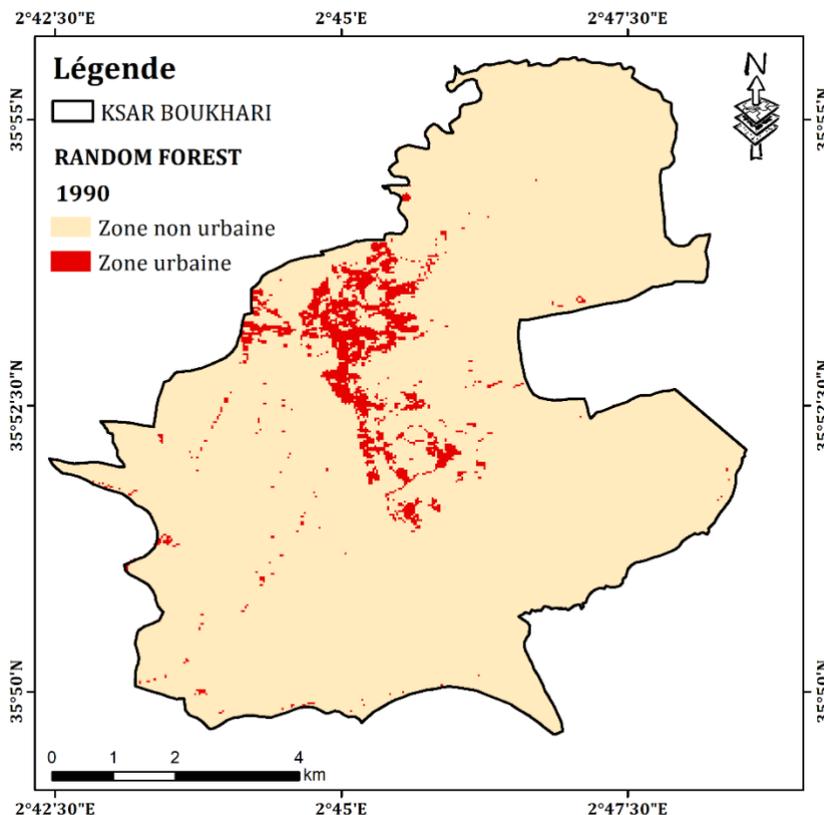


Figure.III.2 : la zone urbaine de ville de Ksar Boukhari en 1990

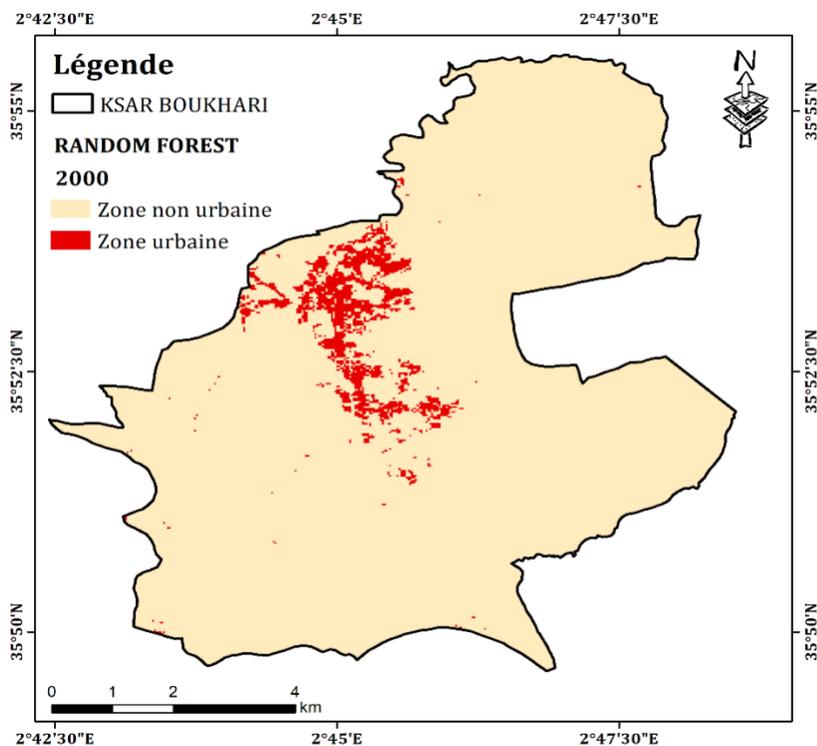


Figure.III.2: la zone urbaine de ville de Ksar Boukhari en 2000

Cela s'est poursuivi en 2010, avec une urbanisation de plus en plus marquée et une transformation progressive des terres agricoles en zones urbaines. En 2021, la ville de Ksar Boukhari a montré une croissance urbaine substantielle, avec des quartiers résidentiels, des infrastructures publiques et commerciales qui ont étendu son emprise sur le territoire. Cette évolution est souvent associée à des défis tels que la gestion de l'eau, l'infrastructure routière et la préservation des terres agricoles. Une compréhension approfondie de cette croissance urbaine est essentielle pour orienter la planification urbaine et garantir un développement durable qui préserve l'équilibre entre les besoins croissants de la population et la conservation de l'environnement local

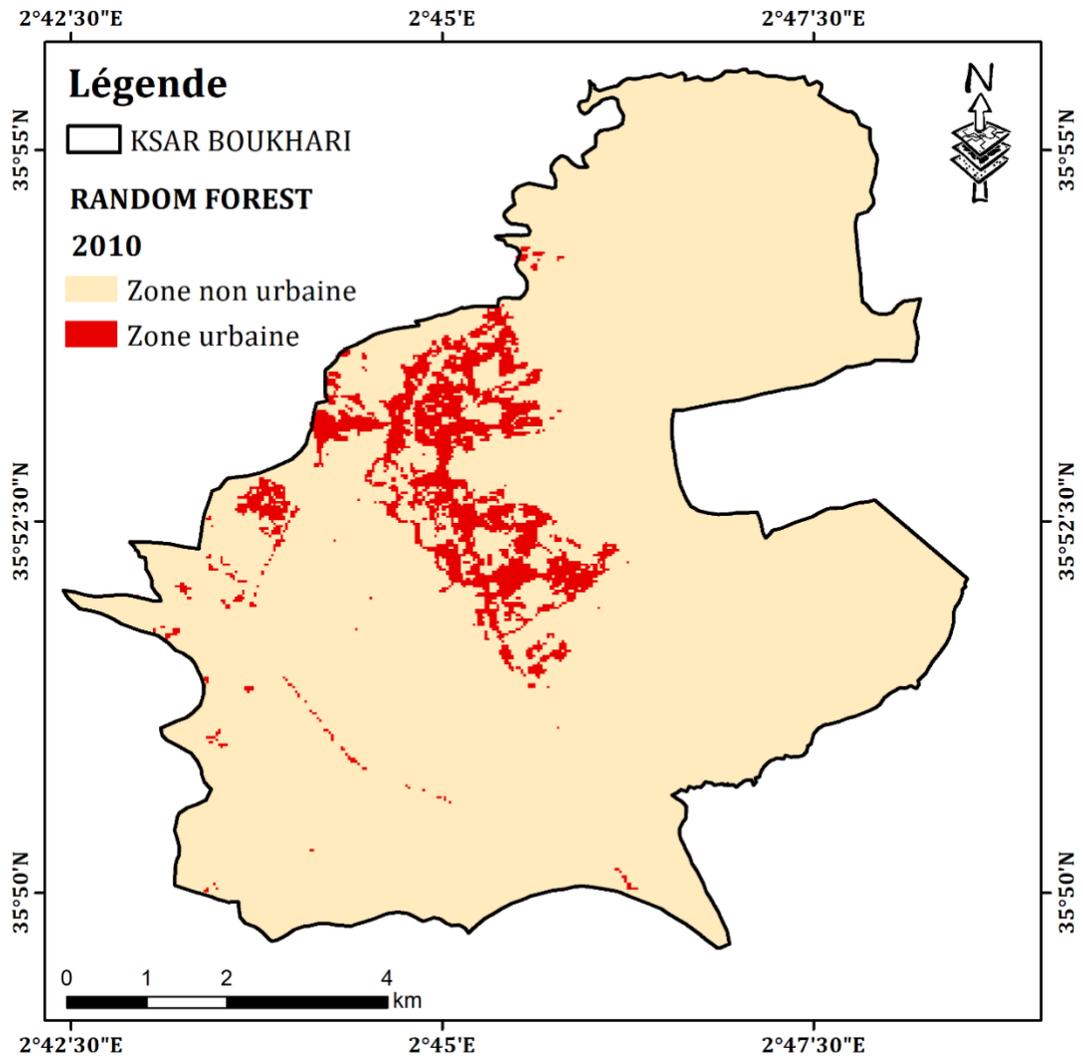


Figure.III.3 : la zone urbaine de ville de Ksar Boukhari en 2010

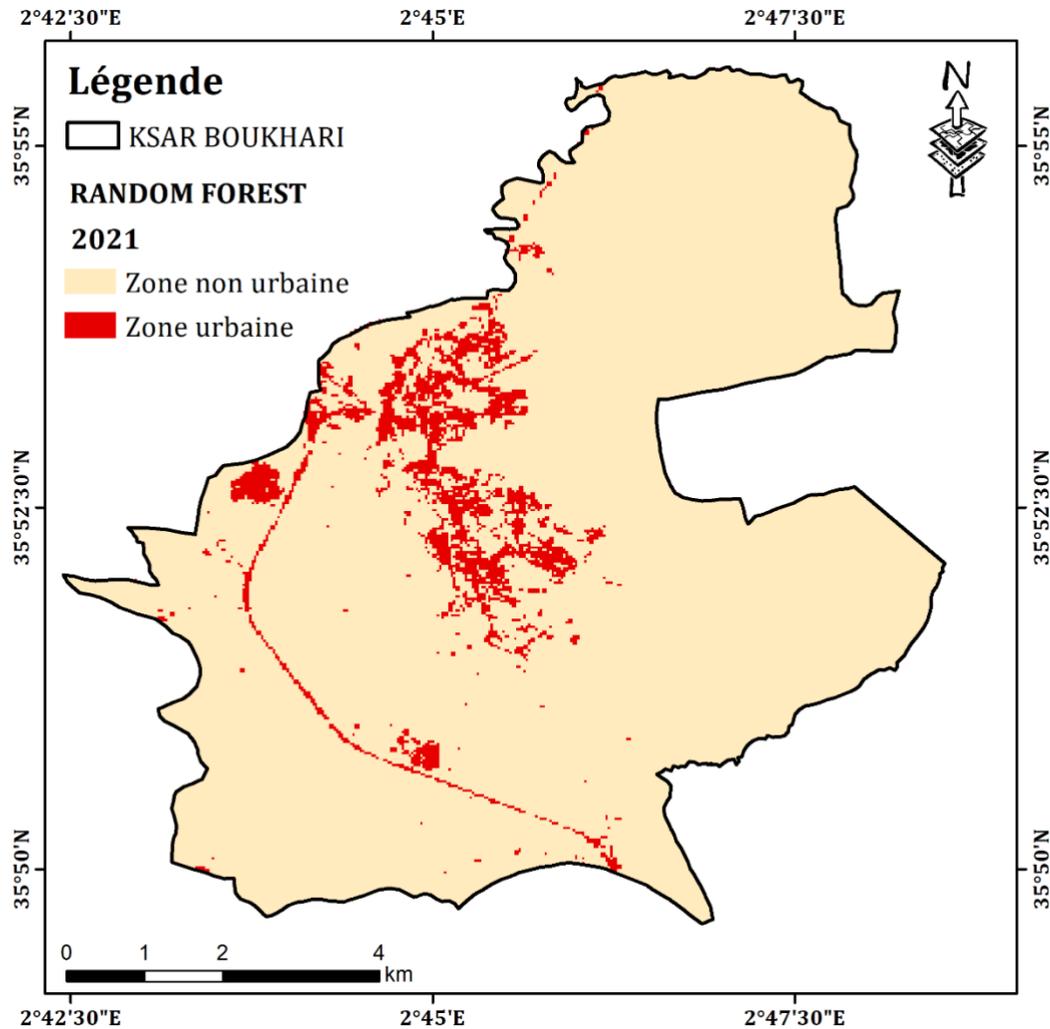


Figure.III.4 : la zone urbaine de ville de Ksar Boukhari en 2021

L'évolution de la ville de Ksar Boukhari, l'augmentation de la population et l'évolution des quantités d'eaux usées sont intrinsèquement liées, et cette relation complexe peut être expliquée de la manière suivante :

Croissance Urbaine : Au fil des années, Ksar Boukhari a connu une croissance urbaine significative, marquée par l'expansion des zones urbaines, le développement de quartiers résidentiels, et l'installation d'infrastructures publiques et commerciales pour répondre aux besoins croissants de sa population. Cette croissance est souvent le résultat de facteurs tels que la migration des populations rurales vers les zones urbaines en quête d'opportunités économiques, ce qui entraîne une augmentation de la population urbaine.

Augmentation de la Population : L'augmentation de la population de Ksar Boukhari est un moteur essentiel de la croissance urbaine. Une population croissante nécessite davantage de logements, d'installations éducatives, de services de santé, de commerces, etc. Cette pression démographique sur la ville contribue à son expansion physique et à la densification de ses zones urbaines.

Évolution des Quantités d'Eaux Usées : À mesure que la population augmente et que la ville se développe, les quantités d'eaux usées générées par les ménages, les entreprises et les infrastructures urbaines augmentent également. Les eaux usées comprennent non seulement les eaux usées domestiques, mais aussi les eaux pluviales et industrielles, qui peuvent être contaminées par divers polluants.

Défis de Gestion des Eaux Usées : Cette augmentation des eaux usées pose des défis majeurs en termes de gestion des déchets liquides. Les infrastructures de traitement des eaux usées existantes peuvent être dépassées, et il peut être nécessaire de développer de nouvelles installations de traitement pour faire face à la demande croissante. De plus, la gestion des eaux pluviales dans un environnement urbain en expansion devient cruciale pour éviter les inondations et la pollution.

Impacts Environnementaux et Sanitaires : Une gestion inadéquate des eaux usées peut avoir des répercussions environnementales et sanitaires graves. Les eaux usées non traitées peuvent contaminer les ressources en eau locales, entraîner des problèmes de santé publique et dégrader l'environnement naturel, notamment les rivières et les sols.

En conclusion, la croissance de la ville de Ksar Boukhari et l'augmentation de sa population sont indissociablement liées à l'évolution des quantités d'eaux usées générées. Une gestion efficace des eaux usées est donc essentielle pour maintenir la qualité de vie des habitants, préserver l'environnement local et favoriser un développement urbain durable. Les décideurs locaux et les urbanistes doivent prendre en compte cette relation complexe lors de la planification de la croissance urbaine et de la gestion des ressources en eau.

III.2. Résultats de la demande en eau et des estimation des eaux usées par WEAP

III.2.1. Demande en eau potable :

Les sites de demande sont représentés par le nombre d'habitant actuel, calculé par le logiciel

WEAP en utilisant le nombre de population et le taux d'accroissement l'année de base 2020. Face à la croissance de la population des agglomérations, la demande en eau potable pour le scenario de référence augmente régulièrement entre 2020 et 2050, elle a augmenté de 3 millions de m3 en 2025, pour atteindre en 2040 environ de 3.92 millions de m3 et elle s'élèvera au total en 2050 à environ 4.6 millions de m3.

Le graphique ci-dessous (figure.III. 5) montre que le site 01, est le plus consommateur en eau domestique ceci traduit par le nombre de la population élevé et le mode de vie dans ces villes.

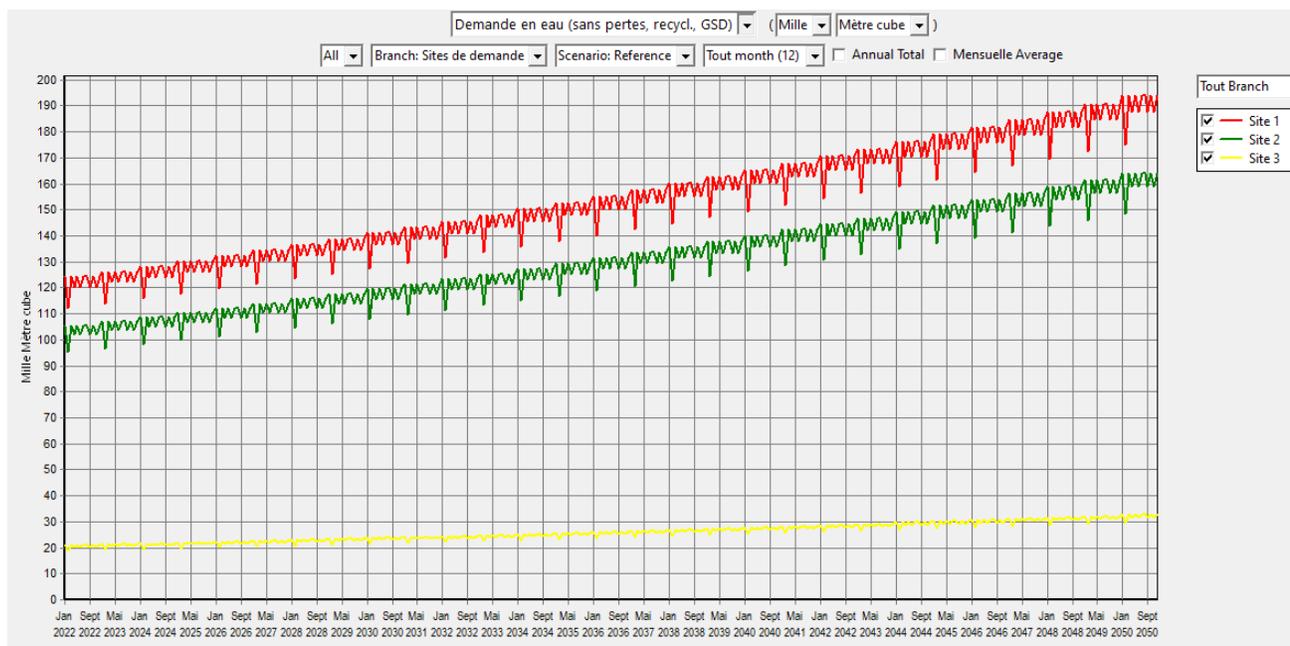


Figure III.5 : Evolution de la demande en eau dans la ville de ksar Boukhari

Tableau.III.2 : Evolution de la demande en eau dans la ville de ksar Boukhari en million M³

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Sum
Site 1	1.53	1.66	1.80	1.95	2.11	2.28	11.33
Site 2	1.30	1.41	1.52	1.65	1.79	1.93	9.60
Site 3	0.26	0.28	0.30	0.33	0.36	0.39	1.91
Sum	3.09	3.35	3.63	3.92	4.25	4.60	22.84

III.2.2. Débits de retour :

Les eaux utilisées d'un site de demande sont envoyées à des destinations diverses, telles qu'une station d'épuration ou le milieu récepteur (Oued), tout en nécessitant des emplacements réutilisant directement. Dans notre cas d'étude, il n'existe pas une station d'épuration qui traite les rejets des eaux usées des agglomérations de Ksar Boukhari.

$$Q_{\text{retour}} = Q_{\text{sd}} - C_{\text{sd}} - Q_{\text{step}}$$

Q_{retour} : Débit de retour d'un site de demande.

Q_{sd} : Débit entrant dans un site de demande.

C_{sd} : La quantité consommée de chaque site de demande selon l'utilisation (AEP).

Q_{step} : Débit entrant dans les stations d'épuration.

Les valeurs du C_{sd} introduites dans le modèle WEAP sont des pourcentages de la consommation des sites de demande (c'est la partie d'eau qui sort du système lors de l'utilisation de l'eau dans les sites de demande).

Les débits de retours mensuels présentés dans la figure 10 montrent les valeurs du scénario de référence qui reflète le cas réel, ils sont de l'ordre de 37575 M^3 en Janvier 2022, et dépassent 46187 M^3 en décembre 2035 pour atteindre $586004 \text{ million M}^3$ en décembre 2050, ces débits sont considérables en terme des eaux non conventionnels. Les eaux traitées peuvent minimiser le manque de l'eau si l'on réutilise pour les besoins journalières, réalimentation artificiels des nappes ou bien pour le domaine agricole et industriels

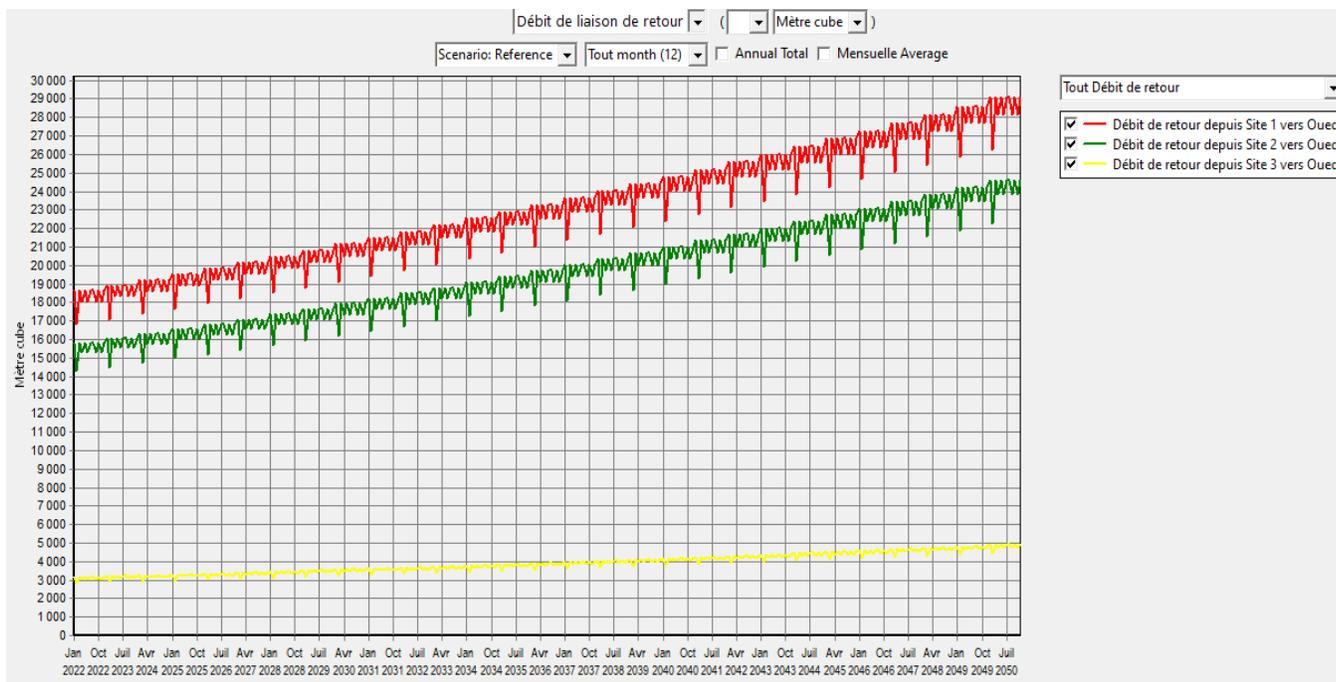


Figure III.6 : Evolution des débits de retours des eaux usées en eau dans la ville de ksar Boukhari

Les résultats mentionnés dans le tableau III.3 présentent une évolution progressive des rejets dans tous les points de rejets. On observe que les valeurs des rejets pour les prochaines décennies sont très élevées (690000 m³ en 2050) pour le scénario de référence.

Tableau III.3 : Evolution des débits de retours des eaux usées en eau dans la ville de ksar Boukhari

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	Sum
Débit de retour depuis Site 1 vers Oued	230140.45	249150.35	269730.49	292010.57	316131.02	342243.85	1699406.74
Débit de retour depuis Site 2 vers Oued	194999.24	211106.43	228544.10	247422.13	267859.52	289985.06	1439916.49
Débit de retour depuis Site 3 vers Oued	38862.04	42072.09	45547.30	49309.57	53382.60	57792.08	286965.69
Sum	464001.74	502328.88	543821.89	588742.28	637373.15	690020.99	3426288.93

III.3. Le processus de sélection du site optimal pour la construction d'une station d'épuration

Le choix d' une station d'épuration à Ksar Boukhari implique une analyse multicritère approfondie afin de prendre en compte les nombreux facteurs qui influencent cette décision

cruciale. Voici un aperçu plus détaillé de certains de ces critères et de leur importance :

Proximité aux Sources de Pollution : L'emplacement de la station d'épuration doit être choisi de manière à minimiser les coûts et la complexité du transport des eaux usées vers l'installation. Une proximité adéquate aux principales sources de pollution, telles que les quartiers résidentiels, les zones industrielles et les infrastructures municipales, est essentielle pour réduire les pertes d'eau et optimiser l'efficacité du système.

Capacité de Traitement : La capacité de la station d'épuration doit être dimensionnée pour traiter les volumes d'eaux usées qui dépasse 600 mille M³ en 2050 selon les résultats obtenues par le model WEAP et en fonction de la croissance démographique et du développement urbain prévus à moyen et long terme. Une marge de manœuvre pour répondre à la croissance future est essentielle pour éviter les obsolescences prématurées.

Contraintes Environnementales : L'impact environnemental de l'emplacement choisi doit être évalué avec soin. Il est impératif de tenir compte de la proximité des ressources en eau locales, des zones sensibles sur le plan écologique, et des réglementations environnementales en vigueur pour minimiser les effets néfastes sur l'écosystème naturel.

Coûts de Construction et de Maintenance : Les coûts de construction initiaux et les coûts de maintenance à long terme de la station d'épuration doivent être pris en compte dans le processus de sélection. Un emplacement qui minimise ces coûts tout en garantissant une performance efficace doit être privilégié.

Acceptabilité Sociale : L'acceptabilité par la communauté locale est un élément critique pour le succès du projet. Il est essentiel d'engager la population locale dans le processus décisionnel, de tenir compte des préoccupations des habitants et de communiquer de manière transparente sur les avantages environnementaux et sanitaires de la station d'épuration.

Résilience aux Événements Extrêmes : Ksar Boukhari peut être soumise à des événements climatiques extrêmes, tels que des inondations. Le site choisi doit être résilient à de telles perturbations pour garantir la continuité des opérations, la sécurité des travailleurs et la protection de l'environnement.

L'application de méthodes d'analyse multicritère, telles que l'Analytic Hierarchy Process

(AHP), permet de pondérer et de comparer ces critères en fonction de leur importance relative, offrant ainsi une base solide pour la prise de décision. Le site optimal pour la station d'épuration devrait émerger comme celui qui maximise les avantages tout en minimisant les inconvénients, contribuant ainsi à une gestion efficace des eaux usées et à un développement urbain durable à Ksar Boukhari.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'évolution de la ville de Ksar Boukhari, l'augmentation de sa population et l'évolution des quantités d'eaux usées sont des éléments interconnectés qui présentent des défis et des opportunités pour la gestion urbaine et environnementale de cette région en croissance constante.

La croissance urbaine de Ksar Boukhari, marquée par une expansion physique et une densification, est alimentée par l'augmentation de la population. Cette croissance crée des besoins accrus en infrastructures, services publics et logements, tout en générant davantage d'eaux usées. La gestion de ces eaux usées est essentielle pour éviter la pollution de l'environnement et les risques pour la santé publique.

L'analyse multicritère s'avère être un outil précieux pour le choix optimal de l'emplacement de la station d'épuration, en prenant en compte des facteurs tels que la proximité aux sources de pollution, la capacité de traitement, les contraintes environnementales, les coûts, l'acceptabilité sociale et la résilience aux événements extrêmes. Cette approche permet de prendre des décisions éclairées et basées sur des données objectives pour assurer une gestion durable des eaux usées tout en préservant l'environnement local.

En somme, l'évolution urbaine de Ksar Boukhari, la croissance de sa population et la gestion des eaux usées sont des éléments clés d'un équilibre délicat entre le développement urbain, la préservation de l'environnement et la qualité de vie des habitants. Une planification et une gestion judicieuses sont indispensables pour garantir un avenir durable pour cette ville en pleine croissance. Il est essentiel de continuer à surveiller et à ajuster ces processus pour répondre aux besoins changeants de la population et aux défis environnementaux à venir.

Références bibliographiques

Ouvrages :

Tokalić, R., Pavić, D., Babić, M. (2020). Integrated water resources management using the WEAP model: A case study of the karst area in Croatia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 1-13.

Ayed, B., Khlif, N., Jmal, I. et al. Intégration des modèles SIG et WEAP pour la gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions arides : cas de l'aquifère peu profond de Djefara-Medenine (Sud-Est tunisien). *Arab J Geosci* 15 , 994 (2022).
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10277-1>

HERVE L., HILMY S., JULIEN C., 2003. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 28, Issues 20–27, Pages 779–786.

YATES D., SIEBER J.,PURKEY D.,HUBER-LEE A., 2005. Weap21-a demand-, priority-, and preference-driven water planning model: Part 2, aiding freshwater ecosystem service evaluation. *Water International*, Volume 30, Number 4, Pages 501–512.

SEI,2008. WEAP (Water Evaluation and Planning): User Guide for WEAP21. Stockholm Environment Institute, Boston USA. Available from <www.seib.org/weap

IRENE M. JOHANNSEN, JENNIFER C. HENGST, ALEXANDER GOLL, BRITTA HÖLLERMANN AND BERND DIEKKRÜGER *.2016. Future of Water Supply and Demand in the Middle Drâa Valley, Morocco, under Climate and Land Use Change. *Water* **2016**, 8, 313; doi:10.3390/w8080313.

PAUL VAN HOFWEGEN, FRANK G.W. JASPERS (1999) Analytical Framework for Integrated Water Resources Management: IHE monographs 2. hardbound edition. Reference – 116 Pages ISBN 9789054104735.

Résumé :

La croissance urbaine dynamique de Ksar Boukhari, en grande partie stimulée par l'accroissement démographique, a entraîné une expansion physique de la ville. Cette croissance a engendré une demande croissante en infrastructures et services urbains, mais également une augmentation significative des eaux usées produites dans la ville.

L'augmentation démographique substantielle à Ksar Boukhari a été un moteur principal de cette croissance, avec une augmentation de la population de plus de 1.6 % au cours de la dernière décennie.

Cependant, cette croissance rapide a également entraîné une augmentation significative des volumes d'eaux usées générées dans la ville, passant d'environ 464000 de mètres cubes par an en 2025 à plus de 690000 de mètres cubes par an en 2050. Cette augmentation des eaux usées nécessite une gestion judicieuse pour éviter la pollution environnementale et garantir la santé publique.

Une gestion judicieuse de ces éléments est cruciale pour préserver la qualité de vie des habitants, protéger l'environnement local et favoriser un développement urbain durable. L'application d'une analyse multicritère aide à prendre des décisions éclairées et équilibrées pour une gestion efficace des eaux usées, contribuant ainsi à l'avenir prospère de cette ville en pleine croissance

Abstract :

The dynamic urban growth of Ksar Boukhari, largely driven by population growth, has led to a physical expansion of the city. This growth has resulted in an increasing demand for urban infrastructure and services, as well as a significant rise in the volume of wastewater generated within the city.

The substantial demographic increase in Ksar Boukhari has been a primary driver of this growth, with a population increase of over 1.6% over the past decade.

However, this rapid growth has also led to a significant increase in the volume of wastewater generated in the city, rising from approximately 464,000 cubic meters per year in 2025 to over 690,000 cubic meters per year by 2050. This increase in wastewater necessitates prudent management to prevent environmental pollution and ensure public health.

Prudent management of these elements is crucial to preserving the quality of life for residents, protecting the local environment, and promoting sustainable urban development. The application of a multicriteria analysis helps make informed and balanced decisions for the efficient management of wastewater, thereby contributing to the prosperous future of this rapidly growing city.

ملخص

النمو الحضري الديناميكي لمدينة قصر بوخاري، الذي يعزى إلى حد كبير إلى زيادة السكان، أدى إلى توسع مادي للمدينة. وقد أسفر هذا النمو عن زيادة في الطلب على البنية التحتية والخدمات الحضرية، فضلاً عن زيادة كبيرة في حجم مياه الصرف الصحي المولدة داخل المدينة.

زيادة السكان الكبيرة في قصر بوخاري كانت واحدة من العوامل الرئيسية لهذا النمو، حيث ارتفعت السكان بأكثر من 1.6٪ خلال العقد الماضي.

ومع ذلك، أدى هذا النمو السريع أيضاً إلى زيادة كبيرة في حجم مياه الصرف الصحي المولدة في المدينة، حيث ارتفعت من حوالي 464,000 متر مكعب سنوياً في عام 2025 إلى أكثر من 690,000 متر مكعب سنوياً بحلول عام 2050. هذا الارتفاع في مياه الصرف الصحي يستدعي إدارة حكيمة لمنع التلوث البيئي وضمان الصحة العامة.

إدارة حكيمة لهذه العناصر أمر بالغ الأهمية للحفاظ على جودة حياة السكان، وحماية البيئة المحلية، وتعزيز التنمية الحضرية المستدامة. تساعد تطبيق تحليل متعدد المعايير في اتخاذ قرارات مستنيرة ومتوازنة لإدارة فعالة لمياه الصرف الصحي، مما يسهم في مستقبل مزدهر لهذه المدينة النامية بسرعة.