



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Université de Hamma LakhderEl Oued

Faculté de la Technologie

Département de hydrolyque et génie civil

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Hydraulique

Option : Ouvrages Hydrauliques

Dégradation des Ghouts dans la commune de Hassani Abdelkerim:
Apport de l'intelligence artificielle

Supervisé par :

Dr. Nabil Mega

Pr. Salim Khechana

Présenté par :

KHALFAOUI Abdelhamid

LEJDEL THELEB Azzeddine

Promotion: 2024

Remerciements

Nos remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant Pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'étude.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur Dr. Nabil MEGA et Co-promoteur Pr. Salim KHECHANA pour leur entière disposition, leurs judicieux conseils, leur patience, leur rigueur persévérance tout au long de notre projet.

Nous remercions nos amis de la société Groupement SONATRACH-ENI.

Nous remercions aussi tous les enseignants du département d'hydraulique, qui tout au long des années d'études nous ont transmis leur savoir sans réserve.

Nous remercions tous nos collègues et amis pour leur aide et leur soutien, et tous ceux qui ont contribué de proche ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail ma chère mère,
à mon père qui m'ont toujours soutenu
et aidé à affronter les difficultés,
pour tous ce qui ont fait pour que je puisse les
honorer, et leur patience durant ma vie.*

A mes très chers frères et à mes chères sœurs, à toute ma famille

A mes chers amis

Résumé

L'intelligence artificielle (IA) a apporté de nombreuses avancées dans le domaine de la télédétection et de l'analyse d'images satellitaires. Un des domaines d'application majeurs est la détection et la cartographie automatisée d'un patrimoine classé : Les Ghouts. La principale approche utilisant l'IA pour cette tâche était la détection d'objets à partir des images satellitaires. Un modèle YOLOv8s s'est entraîné pour identifier individuellement les différentes classes des Ghouts dans la commune de Hassani Abdelkerim (Wilaya d'El Oued – sud est de l'Algérie), en localisant et délimitant chaque groupement de palmiers. Cela a permis d'obtenir des statistiques détaillées sur la densité, la taille et la répartition des Ghouts. Cette étude nous a permis d'exploiter la richesse des données de télédétection multi spectrales pour caractériser finement les propriétés des Ghouts (pleins, partiels, dégradés), avec une précision concluante. Cela ouvre la voie à une gestion plus précise et durable des Ghouts.

المخلص

هناك تقدم كبير في مجال استخدام الذكاء الاصطناعي في مراقبة وتحليل الصور الفضائية. أحد المجالات الرئيسية للتطبيق هو الكشف والرسم الخرائطي الآلي لموروث محمي وهو "الغوط". الطريقة الرئيسية المستخدمة للذكاء الاصطناعي في هذه المهمة هي الكشف عن الأجسام من الصور الفضائية. تم تدريب نموذج YOLOv8 على تحديد فئات الغوط المختلفة في بلدية حساني عبد الكريم (ولاية الوادي – جنوب شرق الجزائر) ، من خلال تحديد موقع ووصف كل مجموعة من النخيل. هذا سمح بالحصول على إحصائيات مفصلة عن كثافة وحجم وتوزيع الغيطان. سمحت هذه الدراسة باستغلال ثروة بيانات الاستشعار عن بعد متعددة الأطياف لوصف خصائص الغوط (كاملة، جزئية، متدهورة) بدقة ملفتة. وهذا يفتح الطريق لإدارة أكثر دقة واستدامة لهذا الموروث المصنف.

Abstract :

Artificial intelligence (AI) has brought many advancements in the field of Remote Sensing and satellite image analysis. One of the major application domains is the automated detection and mapping of a classified heritage site: the Ghouts. The main approach using AI for this task was object detection from satellite imagery. A YOLOv8 model was trained to individually identify the different classes of Ghouts in the commune of Hassani Abdelkerim (Wilaya of El Oued - southeastern Algeria), by locating and delineating each palm grove cluster. This allowed obtaining detailed statistics on the density, size and distribution of the Ghouts. This study allowed us to leverage the richness of multispectral remote sensing data to finely characterize the properties of the Ghouts (full, partial, degraded), with conclusive precision. This paves the way for more precise and sustainable management of the Ghouts.

Liste des Figures

Figure 01. Localisation administrative de la zone d'étude.	6
Figure 02. Carte géologique du grand Erg Oriental (Cornet, 1964).....	9
Figure 03. Carte des altitudes de la région du Souf (A.N.R.H., 2005).....	11
Figure 04. Température moyenne mensuelle (O.N.M., 2020).	12
Figure 05. Précipitations moyennes mensuelles (O.N.M., 2020).	13
Figure 06. Diagramme ombrothermique de la région d'Oued Souf (O.N.M., 2020).	14
Figure 07. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972).	17
Figure 08. Carte de vulnérabilité de la zone d'étude (Khelil & Bourougraa, 2020).	18
Figure 09. REMMAL creuse dans le sable.	21
Figure 10. Schéma conceptuel d'un Ghout.	22
Figure 11. Schéma présentant un Ghout dans la zone éolienne.	23
Figure 12. Schéma présentant un Ghout allongé.	24
Figure 13. Schéma présentant un Ghout rectangulaire.	25
Figure 14. Coupe d'un Ghout rectangulaire (Cote Marc, 2006).	25
Figure 15. Balancier (Ghôtara) pour l'irrigation dans un Ghout.	26
Figure 16. Coupe d'une Séguia.	27
Figure 17. Des agriculteurs construisent une ceinture de Zerb (....	28
Figure 18. Fabrication artisanale d'un mini pivot.	29
Figure 19. Développement de la production des pommes de terre (D.S.A, 2015).	30
Figure 20. Le nombre de palmiers du Souf au début de XX ^e siècle (Najah, 1970).	31
Figure 21. Un Ghout inondé.	31
Figure 22. Exemples de fuites du réseau d'A.E.P dans la commune d'El Oued.	32
Figure 23. Situation d'un Ghout ennoyé complètement par les eaux usées	33
Figure 23. FPS des différents modèles de détection d'objets (Redmon et al., 2016).	39
Figure 24. Temps d'inférence des différents modèles de détection d'objets (Redmon et al., 2016).	40
Figure 25. Tableau des performances des différentes versions de YOLO	43
Figure 26. Image de Google Earth Pro de Hassani Abdelkarim en 2024.	47
Figure 27. Image qui représenter l'annotation d'image par Roboflow.	48
Figure 28. L'organisation des données dans Roboflow.	48
Figure 29. Un code Python pour l'entraînement du modèle YOLOv8s.	49
Figure 30. Un extrait d'un code Python pour valider le modèle YOLOv8.	49
Figure 31. La performance (Accuracy) de la validation du modèle.	50
Figure 32. Graphiques d'entraînement et de validation du modèle.	51
Figure 33. Image du modèle YOLOv8 de Hassani Abdelkarimen, en 2007.	54
Figure 33. Image du modèle YOLOv8 de Hassani Abdelkarimen, en 2023.	54

Liste des tableaux

Tableau 01. Surface et population de la commune de Hassani Abdelkerim.	6
Tableau 02. Température moyenne mensuelle.....	12
Tableau 03. Précipitations moyennes mensuelles.	13
Tableau 04. Couple température/ précipitation mensuelle interannuelle:	14
Tableau 05. Classification en fonction de l'indice d'aridité.	15

Liste des abréviations

- **ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydriques
- **CCNUCC** : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
- **CH4**:Méthane
- **CHIRPS**: Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations
- **CO** : Monoxyde de Carbone
- **CO2** : Dioxyde de Carbone
- **CT**: Complex Terminal
- **GCM**: General Circulation Model
- **GEE** : Google EarthEngine
- **GES** : Gaz à Effet de Serre
- **GIEC** : Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Evolution du Climat
- **GWP**: Global Warming Potential
- **LST**: Land Surface Temperature
- **MODIS**: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
- **NEX-GDD**: NASA Earth Exchange - Global Daily Downscaled Climate Projections
- **NDVI**: Normalized Difference Vegetation Index
- **NO2**:Dioxyde d’Azote
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **PP** : Précipitations
- **PPB** : Parts Per Billion
- **PPM** : Parts Per Million
- **RCPs** : Representative Concentration Pathways

Sommaire

Remercîments	i
Dédicace.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract :	iii
Liste des Figures	v
Liste des tableaux	vii
Liste des abréviations	viii
Sommaire.....	ix
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Présentation de la région d'étude

I.1. Introduction	5
I.2. Situation géographique.....	5
I.3. Présentation administrative et démographique	6
I.4. Géologie de la région d'étude	6
I.5. Géomorphologie.....	9
I.5.1. Tercha.....	9
I.5.2. Louss	9
I.5.3. Salsala ou Smida	9
I.5.4. Tefza.....	9
I.6. Le relief	10
I.7. Le climat.....	11
I.7.1. Température	12
I.7.2. Précipitations.....	12
I.7.3. Le vent.....	13
I.7.4. Diagramme ombrothermique	13
I.7.5. L'indice d'aridité.....	15
I.8. Cadre hydrogéologique général	15
I.8.1. La Nappe phréatique	15
I.8.2. Complexe Terminal (CT).....	16
I.8.3. Nappe du Continent Intercalaire (CI).....	16
I.9. Vulnérabilité de la nappe phréatique de la zone d'étude	17
I.10. Conclusion.....	19

Chapitre II: Les Ghouts : Un patrimoine à conserver

II.1. Introduction.....	21
II.2. L'agro-système Soufi et ses implications	21
II.3. Formes des Ghouts.....	22
II.3.1. Les Ghouts circulaires.....	22
II.3.2. Ghouts allongés.....	23
II.3.3. Ghouts rectangulaires.....	24
II.4. Technique d'irrigation dans les Ghouts	26
II.5. Protection des Ghouts	27
II.6. Nouvel intrus agraire dans la région du Souf (mini pivot)	28
II.7. Problèmes menaçant l'existence des Ghouts	30
II.8. Un patrimoine classé par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (F.A.O)	33
II.9. Conclusions.....	34

Chapitre III : Les concepts de l'IA dans la reconnaissance des formes

III.1. Introduction	36
III.2. L'apport de l'Intelligence Artificielle en télédétection spatiale	36
III 2.1. Techniques de l'intelligence artificielle employées	36
III 2.2. Prétraitement des données	37
III 2.3. Détection d'anomalies.....	37
III 2.4. Segmentation et analyse d'images	37
III 2.5. Détection d'objet.....	37
III 2.6. Applications concrètes de l'IA en télédétection spatiale	37
III.3. Modèles en question	38
III.4. Critères de choix du modèle	40
III.4.1. Caractéristiques principales de YOLO	40
III.4.2. Critères de sélection de YOLOv8 par rapport à d'autres versions.....	41
III.5. Pourquoi choisir YOLOV8 ?	43
III.5.1. Nature de l'application.....	43
III.5.2. Complexité des données	43
III.5.3. Contraintes matérielles	44
III.5.4. Ensemble de données disponibles	44
III.5.5. Exigences en précision	44
III.6. Conclusion	44

Chapitre IV: Résultats du modèle

IV.1. Introduction	47
IV.2. La détection des Ghouts par YOLOV8	47
IV.2.1. Sélection des images	47
IV.2.2. Annotation des données	47
IV.2.3. Préparation du jeu de données.....	48
IV.3. Exécution du modèle YOLOv8.....	48
IV.3.1. Entraînement du modèle.....	48
IV.3.2. Validation du modèle	49
IV.3.3. Évaluation du modèle.....	50
IV.4. Interprétation et analyse des graphiques (Fig. 31)	51
IV.4.1. Perte de boîte (train/box_loss).....	51
IV.4.2. Perte de classe (train/cls_loss).....	51
IV.4.3. Perte DFL (train/dfl_loss)	52
IV.4.4. Précision (metrics/precision(B)).....	52
IV.4.5. Rappel (metrics/recall(B)).....	52
IV.4.6. mAP50 (metrics/mAP50(B)).....	52
IV.4.7. mAP50-95 (metrics/mAP50-95(B))	52
IV.5. Déploiement du modèle	53
IV.6. Détection des Ghouts de Hassani Abdelkerim	53
IV.6.1. Interprétation générale des deux images	53
IV.6.1.1. Image de 2007 (Fig. 32)	53
IV.6.1.2. Image de 2023 (Fig. 33)	53
IV.6.2. Comparaison entre 2007 et 2023.....	53
IV.7. Conclusion.....	55
Conclusions générales	56
Références bibliographiques.....	59

Introduction générale

Les écosystèmes, ce sont tous les milieux naturels au sein desquels vivent des espèces vivantes (végétales ou animales) et où ont lieu des processus vivants. Les forêts, les mers, les marais, les déserts sont tous des écosystèmes et la biodiversité qu'ils habitent est un élément essentiel aux équilibres naturels. Bien évidemment, tous ces écosystèmes et cette biodiversité sont en permanence en transformation, ils évoluent au fur et à mesure du temps, des processus évolutifs, des changements. Depuis plusieurs décennies, la qualité de l'environnement se dégrade et sa capacité à nous fournir ses précieux services et ressources se limite. Les activités d'origines naturelles comme le rabattement de la nappe phréatique, conditions climatiques extrêmes et autres, et d'autres d'origines anthropiques (sous l'action de l'Homme), comme l'extension urbaine sont à l'origine de cette dégradation. Aujourd'hui, on associe de plus en plus souvent le mot environnement à celui de pollution.

Le développement important de la région d'El Oued durant les 30 dernières années a exigé un besoin considérable en eau potable. Cette situation est due à une forte concentration de population, l'irrigation en agriculture (gros consommateurs) qui constituent à la fois l'activité principale dans cette région et un moyen de fixation des populations locales, l'industrie, le commerce, le tourisme et l'apparition de nouveaux modes de vie ont aboutis à la consommation excessive de l'eau, et à la dégradation d'un patrimoine prestigieux, classé par L'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (Food and Agriculture Organisation - FAO) a décidé en 2011 de classer le Ghout comme patrimoine agricole universel, en tant que système ingénieux, au vu de ce qu'il représente comme intérêt historique, socio-économique et culturel d'intérêt mondial. Le Ghout, ou pyramide inversée, est non seulement un mode cultural efficace mais aussi un site touristique par excellence, que ce soit pour le tourisme intérieur qu'étranger, au vu de ses caractéristiques singulières reflétant le génie de ses concepteurs qui ont permis l'émergence de palmeraies verdoyantes et source vivrière pour la population, dans un espace géographique saharien, aride et hostile, mais aussi le développement d'une variété de dattes de haute qualité connue sous l'appellation de "Baâli".

Afin de préserver ce patrimoine contre la dégradation, on a exploré en profondeur les concepts et techniques de l'Intelligence Artificielle (IA), appliquées, à la reconnaissance des formes dans la télédétection spatiale. Le modèle sélectionné YOLOv8 nous a permis de détecter et de prévoir les Ghouts menacés par le risque de disparition, sous diverses causes (naturelles ou anthropiques). YOLOv8 se distingue particulièrement par sa rapidité, son efficacité en termes de calcul et sa capacité à détecter des objets avec précision et fiabilité

dans des images complexes, en faisant un choix privilégié pour les applications de télédétection nécessitant une détection rapide et précise

Les résultats obtenus montrent une relation accrue entre les Ghouts dégradés et les régions présentant un degré de vulnérabilité forte, vis-à-vis la pollution de la nappe phréatique.

Notre travail de mémoire de fin d'étude est structuré de la manière suivante:

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, le contexte géographique, climatique et géologique de la commune de Hassani Abdelkerim - Wilaya d'El Oued.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons quelques notions sur le concept des Ghouts (architecture, type, mode d'exploitation et risques).
- Pour le troisième chapitre, quelques notions d'intelligence artificielle, différents modèles en question et le choix du modèle approprié de l'étude seront exposés.
- Finalement, le quatrième chapitre, sera consacré à l'analyse des différents résultats obtenus, sorties et performances du modèle, suivis par des interprétations et commentaires.

A la fin, des conclusions et des recommandations seront présentées par la suite.

Chapitre I : Présentation de la région d'étude

I.1. Introduction

Le paysage traditionnel du Souf est marqué par une beauté spécifique, car l'originalité du Souf (établissement humain créé dans un Erg) est grande. Mais sa splendeur n'est pas seulement dans le mouvement des dunes ocre ou blanches de l'Erg, elle est aussi dans une création humaine inattendue. El Oued, la capitale du Souf, est une ville aux mille coupoles dont l'architecture se démarque de celle des autres villes sahariennes. Plutôt que des terrasses, les maisons sont recouvertes de coupoles.

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques topographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques de la région d'El Oued, dont la commune de Hassani Abdelkerim fait partie.

I.2. Situation géographique

La région d'Oued Souf appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de la faible altitude est située au sud-est du pays. Elle forme une Wilaya depuis 1984, elle compte douze Daïras et trente communes jusqu'en 2019, puis, respectivement dix et vingt-deux depuis cette date à la suite de la création de la Wilaya d'El M'Ghair, et couvre une superficie totale de 35.750 km². (Ar.wikipedia.org)

Elle est limitée (Fig. 01) :

- Au nord, par les Wilayas de Tébessa, Khenchela et Biskra ;
- A l'ouest, par les Wilayas d'El M'Ghair et de Touggourt ;
- Au sud, par la Wilaya de Touggourt ;
- Et à l'est, par la république Tunisienne.

Géographiquement la wilaya d'El Oued est limitée par les coordonnées suivantes:

Longitudes X1 = 06°00' et X2 = 07°00' Est

Latitudes Y1 = 33°30' et Y2 = 34°00' Nord.

Cette région tire son originalité de son architecture typique, caractérisée par les coupoles et par ses palmeraies plantées dans les Ghouts.

La vallée de Souf n'est pas un bassin versant mais une unité de ressource en eau qui est délimitée

- Au sud par la mer de dunes du grand Erg oriental ;
- A l'est par une série de Chotts ;
- A l'ouest par Oued Righ (fleuve de fossile) et par la ligne de palmeraie qui court de Biskra à Touggourt.

I.3. Présentation administrative et démographique

La zone d'étude occupe une superficie de 77 km², qui représente la commune chef-lieu de la Wilaya d'El Oued, et englobe une population de 169 345 habitants (Tableau 01), selon le recensement du 2016 (D.P.S. d'El Oued, 2016).

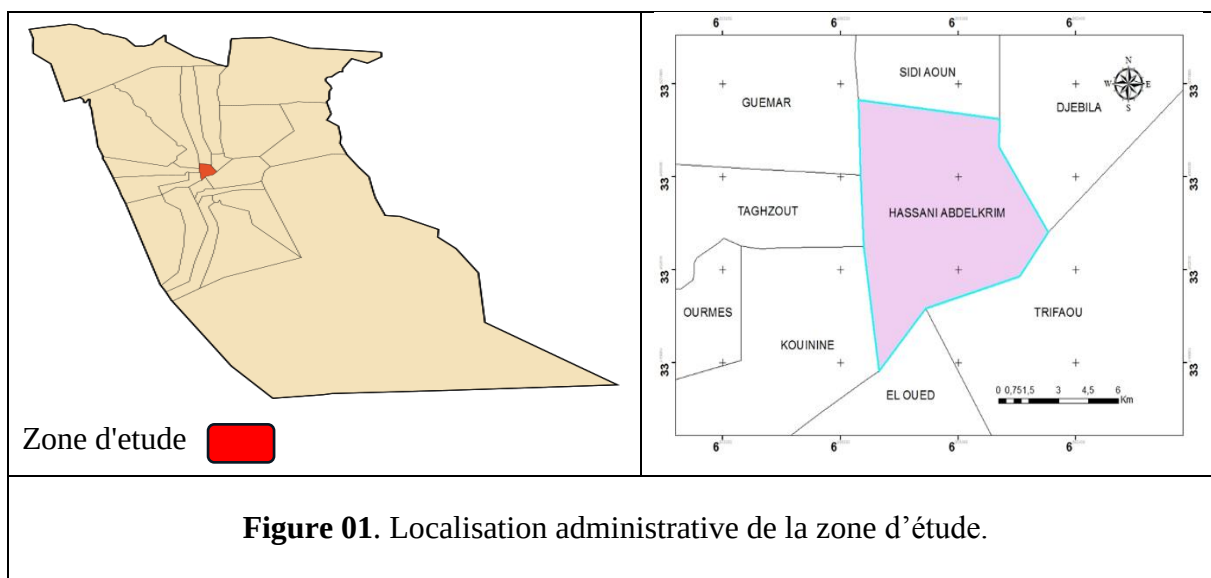


Tableau 01. Surface et population de la commune de Hassani Abdelkerim.

Commune	Population (hab)	Surface (km ²)	Densité populaire (hab/km ²)
Hassani Abdelkerim	32 765	58	564,94

(D.P.S. D'El Oued, 2016)

I.4. Géologie de la région d'étude

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie car elle permet la détermination des horizons susceptibles d'être aquifères.

La région d'étude est exactement dans la partie nord de la plateforme saharienne caractérisée par des formations détritiques particulièrement sableuses (Fig. 02). Elles apparaissent sous forme de dunes et anti dunes. Car le sous-sol de la région étant sableux et assurant l'infiltration et la circulation souterraines des eaux, est essentiellement représenté par des formations sablo-gréseuses du Continental Intercalaire, et des accumulations sableuses fluviaux-lacustres tertiaires continentales.

Sur l'ensemble de la région d'El-Oued, les formations Mio-pliocènes sont recouvertes par une épaisse couche de dépôts Quaternaires présentés sous forme de dunes

donnant naissance à un immense erg qui lui-même fait partie de l'extension du grand erg oriental.

D'après Cornet (1964), Bel (1968) et les coupes de sondages établies à partir des forages, les profondeurs des étages varient d'une région à l'autre sur la base des logs de forage de l'Albien faite par l'ANRH (1993) sur la région d'Oued Souf, nous citons les principales strates repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers la plus récente.

❖ **Le Barrémien**

Cet étage est capté par tous les forages du continental intercalaires réalisés dans cette région, il présente une lithologie d'alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 mètres.

❖ **L'Aptien**

Comme le Barrémien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marnocalcaires. D'après les coupes géologiques des forages réalisées dans la région, l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres.

❖ **L'Albien**

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres ; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres.

❖ **Le Vraconien**

C'est en fait, une zone de transition entre l'Albien sableux et le Cénomani argilo carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo dolomitiques. On montre aussi des argiles sableuses et de rares passées de grès à ciment calcaire. Dans la zone d'étude, l'épaisseur de cet étage varie entre 250 et 300 mètres. En raison de l'importance de ses niveaux argileux, il constitue une importante couverture de l'Albien.

❖ **Le Cénomani**

Tous les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Cet étage joue le rôle d'un écran imperméable. Quant aux limites de cet étage, on peut dire que la limite inférieure est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui la distingue nettement, la limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspondants à la limite inférieure du Turonien.

❖ **Le Turonien**

Cet étage représente la base du complexe terminale. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies micro cristallines compactes avec des intercalations de calcaires Turoniens et parfois de marnes. Les forages de la région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 mètres.

❖ **Le Sénonien**

La plupart des études géologiques effectuées à travers le Sahara algérien montrent que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents du point de vue faciès : l'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base et l'autre au Sénonien carbonaté au sommet.

❖ **Sénonien lagunaire**

La limite de ce sous étage est bien distinguée. Le Sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporé avec des argiles où ces derniers sont aisément différenciés de ceux du Turonien. Il est constitué également d'anhydrites, de calcaires dolomitiques d'argiles et surtout les bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine 150 mètres. La limite supérieure de cette formation coïncide avec le toit de la dernière intercalation anhydride.

❖ **Le Sénonien carbonaté**

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques avec des intercalations marno argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés. Son épaisseur dépasse parfois les 300 mètres. Il faut mentionner par ailleurs l'existence d'une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène, qui présentent des calcaires de même nature avec présence de nummulites.

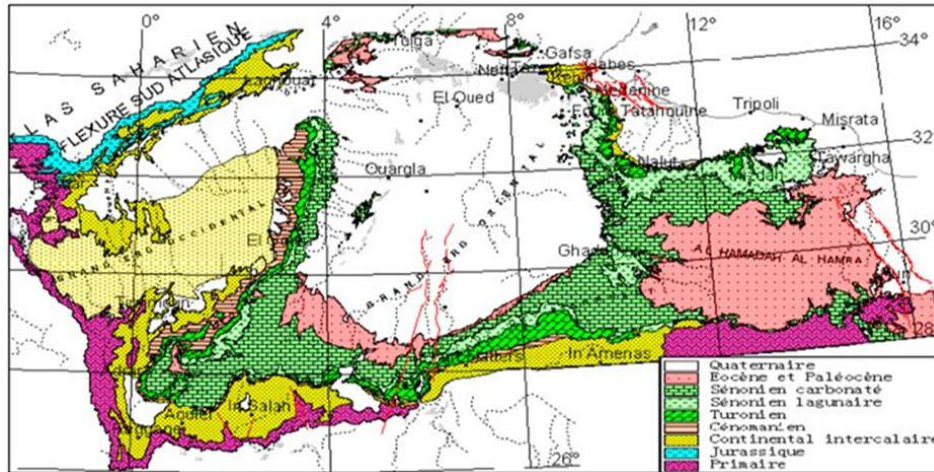


Figure 02. Carte géologique du grand Erg Oriental (Cornet, 1964).

I.5. Géomorphologie

De l'Oued et jusqu'à El-Ogla24 (Km plus loin), on remarque l'absence totale de « Tefza » (pierre à plat calcaire), tandis que sur un autre axe allant de ElOued à Ghamra (en passant par Tiksebt, Kouinine et Guemar) la « Tefza » y occupe tout le terrain.

Ainsi deux bandes de terrains sédimentaires, de formations différentes, renfermant des roches dissemblables dont dépend de la qualité de la nappe aquifère, prolongent de part et d'autre sur les principaux axes du Souf.

Une coupe dans le sol, nous permet de distinguer :

I.5.1. Tercha

Formé de fins cristaux qui lui donnent un aspect de grès ; se rencontre en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer.

I.5.2. Louss

Le Louss est fait de cristaux de gypse en fer de lames imbriqués, il se rencontre sous forme de couches continues, très dures de réseaux mélangés au sable, de bancs isolés ou de colonnes qui semblent être constituées autour d'anciennes racines gypseuses.

I.5.3. Salsala ou Smida

Se trouve en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer comme le Louss, mais c'est plus fins et plus serrés.

I.5.4. Tefza

C'est un grès blanc assez dur, et constitue la pierre à chauffer qui donnera le plâtre. Tercha, Louss, Salsala, Smida et Tefza sont les appellations locales, utilisées pour les différentes couches géologiques.

I.6. Le relief

Le relief de la commune de Hassani Abdelkerim est caractérisé par l'existence de trois principales formes :

- **Une région sableuse** : qui se présente sous un double aspect ; l'Erg et le Sahara.
- **Une forme de plateaux rocheux** : qui s'étend vers le sud, avec une alternance de dunes et de crêtes rocheuses.
- **Une zone de dépression** : caractérisée par la présence d'une multitude de Chotts qui plongent vers l'est.

Il est à signaler que l'altitude diminue du sud vers le nord et de l'ouest vers l'est pour devenir négative au niveau des Chotts (Fig. 03).

La variation de cote est relativement faible, le point le plus bas correspond à la cote 130m, alors que le plus haut atteint la 60m.

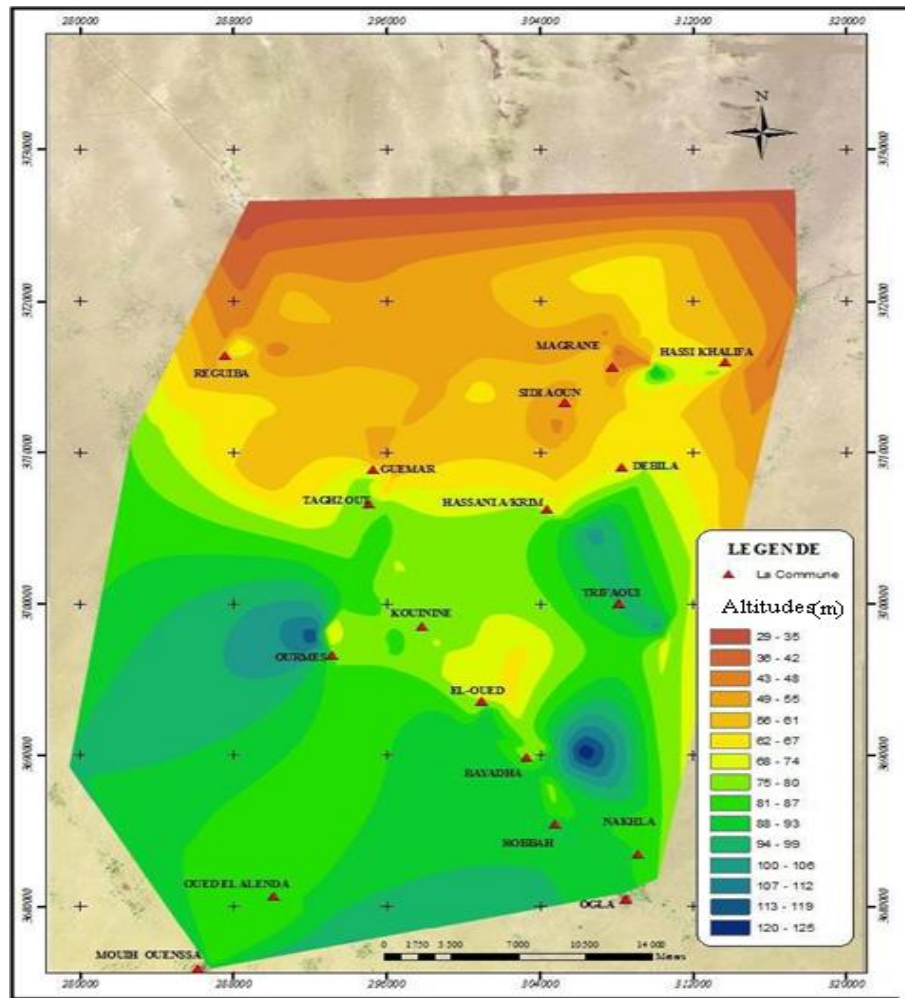


Figure 03. Carte des altitudes de la région du Souf (A.N.R.H., 2005)

I.7. Le climat

Le climat joue un rôle essentiel dans la morphologie du relief, sur la végétation, la genèse et le type des sols et sur les activités agricoles. L'objectif principale de toute étude climatologique est l'établissement pour une période donnée un bilan hydrique dont les paramètres principaux nécessaires à son établissement sont : les précipitations et la température. Le climat algérien est caractérisé par sa grande variabilité de précipitations et des températures mensuelles, cette variation est due essentiellement aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la Méditerranée et du Sahara.

Pour analyser les paramètres climatiques, on a utilisé les données de la station météorologique de l'O.N.M. (Office National Météorologique) de l'aéroport de Guemar, qui représente la seule station existante dans la zone d'étude. Ces données sont recueillies pour une période de (10 ans).

Les coordonnées de la station climatologiquesont :

- Altitude: 64m.
- Longitude: 06°47'E.
- Latitude:33°30 ' N.

I.7.1. Température

L'étude hydrogéologique de la zone d'étude devrait comporter l'analyse du caractère thermique, car l'étude de l'évolution de la température est d'une grande importance dans l'estimation de l'évaporation et de l'évapotranspiration ce paramètre rend compte également de son apport d'énergie à la végétation au pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées et enfin, il est à l'origine du fonctionnement du cycle de l'eau. Le Souf est caractérisé par des étés brûlants qui sont aussi durs que ceux qui s'observent dans le Sahara central.

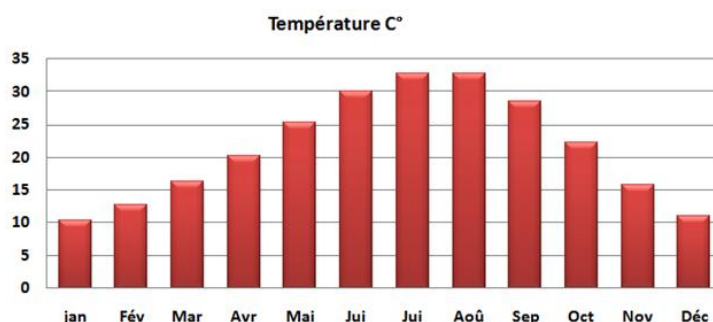
Tableau 02. Température moyennemensuelle.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
T (°C)	11,41	13,73	15,50	20,35	25,23	29,95	33,75	33,21	27,94	21,75	16,70	10,35	21.65

(O.N.M., 2020)

Ce tableau montre une variabilité de température dans la période qui s'étale du mois de novembre au mois d'avril (correspond à la période froide) avec un minimum durant le mois de décembre de 10,35 °C. Alors que la période chaude commence à partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre, avec un maximum de température relevé pendant le mois de juillet de 33,75 °C. La moyenne annuelle est de l'ordre de 20,97 °C (Fig. 04).

• Température



M

Figure 04. Température moyenne mensuelle (O.N.M., 2020).

I.7.2. Précipitations

La pluviométrie joue un rôle essentiel dans la description du climat d'une région. Précipitation : c'est le nom donné à des cristaux de glace ou à des gouttelettes d'eau qui, après avoir subi des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus

trop lourds pour rester en suspension dans l'atmosphère au sol. Le tableau 03 nous montre une grande irrégularité des précipitations moyennes mensuelles, avec un maximum de l'ordre de 12.73 mm ; enregistré pendant le mois de janvier, un minimum de l'ordre de 0.99 mm enregistré pendant le mois de juin, et une précipitation moyenne mensuelle de 77.25 mm (Fig. 05).

Tableau 03.Précipitationsmoyennesmensuelles.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P (mm)	12.73	7.92	7.24	7.95	5.15	0.99	1.18	2.60	5.90	6,13	7.25	12.21	77.25

(O.N.M., 2020)

- **Précipitations**

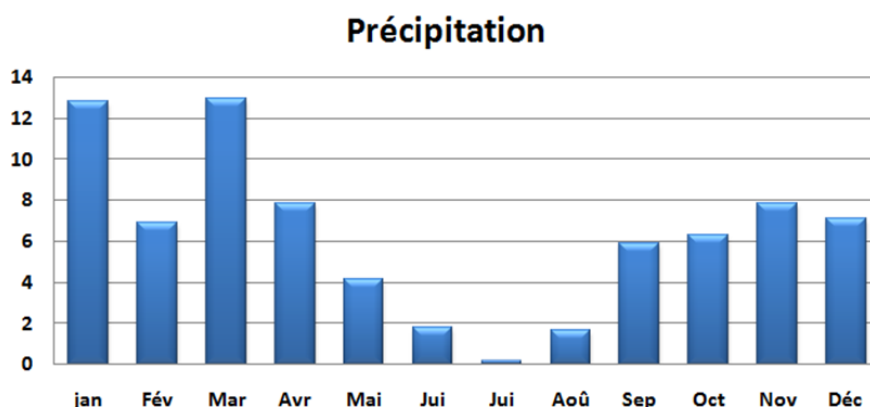


Figure 05. Précipitations moyennes mensuelles (O.N.M., 2020).

I.7.3. Le vent

Nous remarquons que les vents sont fréquents durant toute l'année. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période allant du mois d'avril jusqu'au mois de juin, avec un maximum de 3.11 m.s^{-1} durant le mois d'avril. Le vent nord-est est prédominé, puis avec un degré moindre ceux de direction ouest et sud-ouest (sirocco), caractérisés par une température élevée. Généralement, c'est au printemps que les vents sont les plus forts (période de pollinisation des palmiers). Ils sont chargés de sables éoliens donnant au ciel une teinte jaune et peuvent durer jusqu'à trois jours consécutifs avec une vitesse allant de 30 à 40 km/h (O.N.M., 2020).

I.7.4. Diagramme ombrothermique

En se basant sur les données des précipitations et des températures mensuelles sur la même période d'observation, on peut établir la courbe pluviothermique ou dite

ombrothermique, dont le but est de déterminer la période sèche et celle humide. Un mois sec est celui où le total moyen des précipitations est inférieur ou égale au double de la température moyenne, du même mois. Cette relation permet d'établir un diagramme ombrothermique, sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations (Fig. 06).

A partir de ce diagramme, on constate que l'année hydrologique de la région d'étude est caractérisée uniquement par une période sèche et l'absence total de la période humide, même pour le mois de janvier qui est marqué par la température la plus basse (10,13 °C) et la précipitation la plus élevée (12.57 mm) (Tableau 04).

Tableau 04. Couple température/ précipitation mensuelle interannuelle :

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy.
T (°C)	10,13	22,51	16,74	20,56	25,91	30,12	32,22	32,74	28,87	22,11	15,93	11,21	22.42
P (mm)	12.57	6.36	7.41	7.77	4.62	1.11	0,98	1.19	5.76	6.33	7.19	12.46	73.75

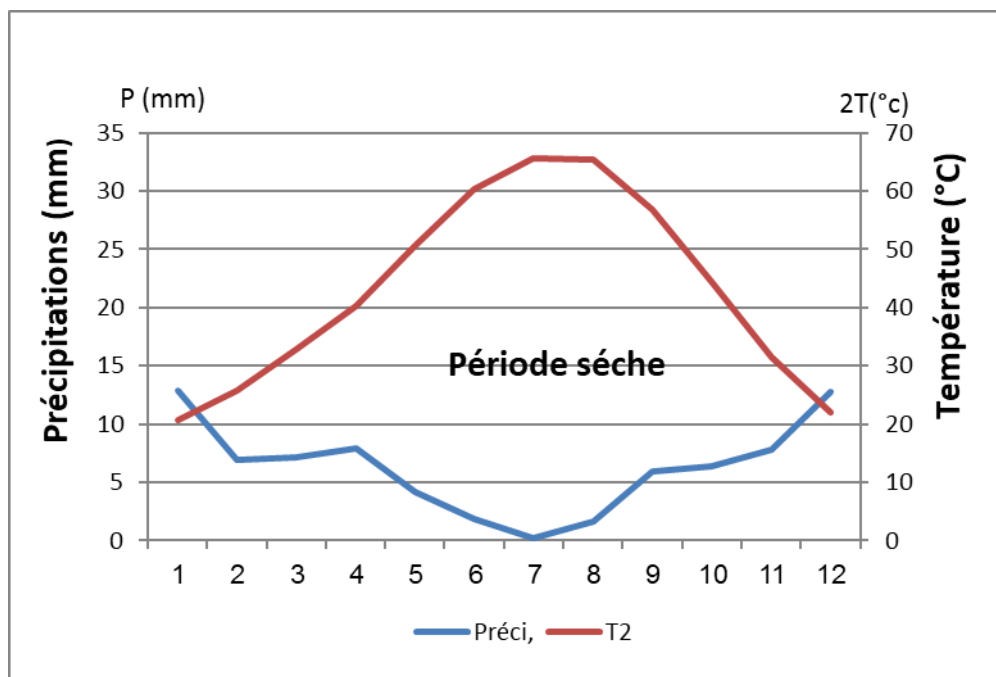


Figure 06.Diagramme ombrothermique de la région d'Oued Souf (O.N.M., 2020).

I.7.5.L'indice d'aridité

Cet indice dépend essentiellement du total des précipitations mensuelles (mm) et la moyenne des températures mensuelles (°C), en appliquant la formule suivante (Equ. 01) :

$$I = \frac{P}{T+10} \dots\dots\dots \text{(Equation 01)}$$

Avec :

- **I** : indice d'aridité.
- **P** : total des précipitations mensuelles (mm).
- **T** : température moyenne annuelle (°C).

▪ **Application numérique :**

P = 73.75 mm, T=21.52 °C.

Donc : I = 2.34

Tableau 05. Classification en fonction de l'indice d'aridité.

Classement de l'indice d'aridité	Type de climat
I < 05	Climat hyperaride
05 < I < 07.5	Climat désertique
07.5 < I < 10	Climat steppique
10 < I < 20	Climat semi-aride
20 < I < 30	Climat tempéré
30	Climat humide

I < 5 (Tableau 05), la chose qui confirme que la région d'El Oued est caractérisée par un climat hyper aride.

I.8. Cadre hydrogéologique général

Les études antérieures ont montré que la région d'étude regroupe trois formations géologiques multicouches, réputées perméables et alternées par d'autres formations hétérogènes et imperméables. Dans la région d'étude, on y distingue trois aquifères qui sont respectivement de haut en bas (Fig. 07) :

I.8.1. La Nappe phréatique

L'eau phréatique partout dans le Souf, repose sur le plancher argilo gypseux du Pontien supérieur. La zone d'aération qui sépare la surface de cette eau de la surface du sol, ne dépasse pas une profondeur moyenne de plus de 40 m de sable non aquifère (Voisin,

2004).L'alimentation de la nappe phréatique dans la zone d'étude est assurée par l'infiltration des eaux de forages profonds (CT et CI) et par les rares et faibles précipitations typiquement sahariennes.

I.8.2.Complexe Terminal (CT)

Ce terme regroupe sous une même dénomination, un ensemble de nappes aquifères qui sont situés dans la formation géologique différentes: Sénonien carbonaté, Eocène et Mio-pliocène sableux.D'après Cornet(1964), nous rappelons l'existence des 03 nappes dont les deux premières correspondent respectivement aux nappes de sables d'âge Miocène (Pontien) et Pliocène, alors que la dernière à l'Eocène inférieur.

I.8.3. Nappe du Continent Intercalaire (CI)

Le terme « CI » correspond ainsi aux formations continentales du Crétacé inférieur. Cette période se situe entre deux cycles sédimentaires régis par une régression marine suivie d'une transgression du Crétacé supérieur. Le Continent Intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base Trias et le sommet de l'Albien.

Le traitement manquant du réservoir aquifère du Continental Intercalaire est son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600 000 Km² et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Bien que l'intérêt majeur de ce système aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eaux qui ont été stockées au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et qui peuvent maintenant être exploitées ; il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoire.

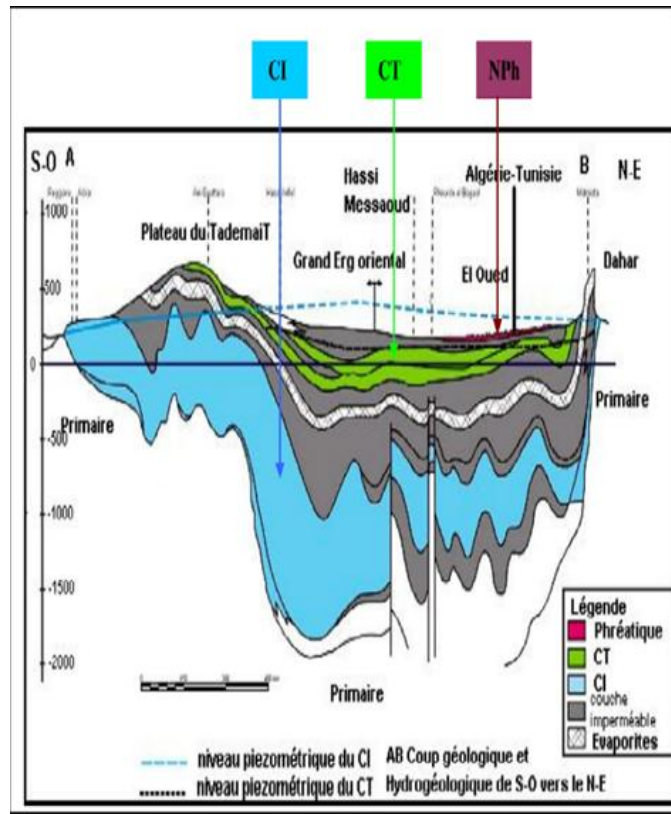


Figure 07. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972).

I.9.Vulnérabilité de la nappe phréatique de la zone d'étude

La profondeur de la surface piézométrique varie entre 7 m et 22 m (Khelil & Bourougraa, 2020). L'examen de la carte de vulnérabilité réalisée par la méthode DRASTIC (méthode élaborée par Aller et al., (1987)), dans le cadre de projet de mémoire de fin d'étude de Master couvrant les communes de Hassani Abdelkerim et Débila, sous la direction du Docteur Miloudi Abdelmonem (Maître de Conférences à l'université d'El Oued) (2020) (Fig. 08), montre que la nappe phréatique de la zone d'étude présente une vulnérabilité forte à moyenne. Les zones des Ghouts irrigués à partir de la nappe phréatique présentant une vulnérabilité forte à cause de la faible profondeur de la zone non saturée. Le reste de la zone d'étude présente une vulnérabilité moyenne.

La classe de vulnérabilité forte, représente 81% de la superficie totale, elle se localise principalement dans les zones agricoles. La profondeur de la nappe dans ses zones est supérieure à 8 m. La classe de vulnérabilité moyenne représente 19% de la superficie totale, elle se localise dans les endroits où la profondeur de la nappe est inférieure à 22 m.

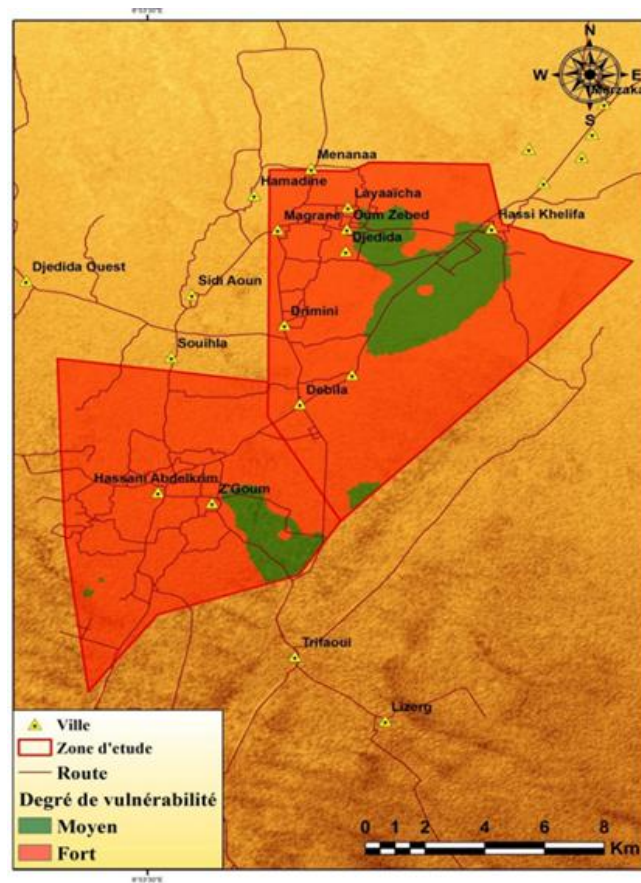


Figure 08. Carte de vulnérabilité de la zone d'étude (Khelil&Bourougaa, 2020).

I.10. Conclusion

A partir de cette étude, nous constatons que la région a une particularité spécifique de point de vue géologique, ainsi que les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, régulière et homogène dans l'espace. Ces conditions ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès. L'analyse climatique a permis de ressortir les résultats suivants:

- La précipitation moyenne mensuelle est de l'ordre de 73.75 mm.
- La température moyenne mensuelle est de l'ordre 22.42 C°.
- La région de Souf a un climat hyper aride.

Le système aquifère est constitué de trois nappes: nappe libre (phréatique), et deux nappes captives (nappe de complexe terminal et nappe de continentale intercalaire). La nappe phréatique de la zone d'étude présente une classe de vulnérabilité forte.

Le chapitre suivant, nous exposons d'une manière détaillée l'architecture des Ghouts, dans la région du Souf.

Chapitre II: Les Ghouts : Un patrimoine à conserver

II.1. Introduction

L'Oasis saharienne traditionnelle opère comme un système agricole, basé sur la combinaison d'eau, d'habitat et de palmeraie. En ce qui concerne le Souf, les Soufis ne sont pas venus s'installer n'importe où dans le Grand Erg. Le centre nord de ce grand ensemble a été sélectionné, c'est-à-dire le secteur qui combine un couvert végétal assez dense et une nappe phréatique proche et abondante. Lorsqu'on évoque l'eau de la nappe phréatique, il est nécessaire d'expliquer le système selon lequel les Soufis exploitent l'eau dans l'oasis, c'est-à-dire le "Ghout". Dans ce chapitre, nous présentons de manière plus approfondie le système/conception du Ghout, en examinant les diverses formes et les systèmes d'exploitation utilisés.

II.2. L'agro-système Soufi et ses implications

La définition du Souf comme oasis saharienne, complantée de palmiers, ne rend pas compte des traits particuliers à la région ; les paysages, comme les conditions d'existence, qui ne se retrouvent pas ailleurs, dérivent d'un système de technique spéciale qui nous donnera l'originalité du Souf : celle-ci réside dans la manière de planter. Les problèmes techniques sont naturellement d'utiliser les ressources en eau ; ici les eaux de la nappe phréatique contenues dans des sables fins et meubles, et situées à une profondeur faible.

La solution adoptée est, non de faire monter l'eau à la surface du sol et d'en irriguer les arbres, mais d'abaisser le niveau du sol, donc de creuser un trou afin que les racines du palmier qu'on plante soient au niveau de l'eau (zone humide) (Fig.09).



Figure 09. REMMAL creuse dans le sable.

Quand la masse de terrain à déblayer dépasse quelques mètres, on comprend aisément qu'il est plus avantageux d'agrandir latéralement un trou existant pour accroître la plantation, que d'en faire un nouveau. Ce système entraîne la création d'une unité technique, une cellule de culture qui est intrinsèquement liée à cette méthode de plantation et qui est typique de la région du Souf : le Ghout. Le terme désigne la cuvette, l'entonnoir, le trou creusé par les mains d'homme, orné de palmeraies (Fig.10), protégé contre le vent et soumis à des règles. Nous dirons : Ghout.

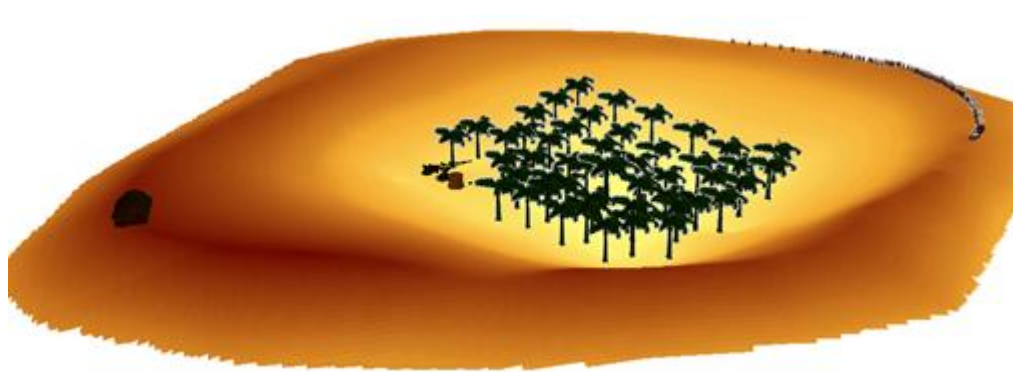


Figure 10. Schéma conceptuel d'un Ghout (Miloudi, 2017).

Creuser des puits dans le sable n'est pas impossible, les nomades le font de loin en loin pour l'eau domestique. Mais entretenir de tels puits dans un matériau qui s'écroule est difficile ; élever l'eau de 10 m jusqu'à la surface du sol est astreignant à une époque d'énergie manuelle ; et le tout ne permettrait d'irriguer qu'un mouchoir de poche (2 ou 3 arbres). Ne pouvant faire venir l'eau à eux, les Soufis ont imaginé d'aller à elle. C'est-à-dire d'excaver suffisamment le sable à l'aide de *REMMAL* pour que l'épaisseur restante ne soit plus que de l'ordre de 1,5~2 m, planter alors les palmiers dans le sol de façon à ce qu'ils aillent puiser l'eau par leurs propres racines.

II.3. Formes des Ghouts

En général, et pour être plus précis, les principaux éléments qui influencent ou déterminent la forme des Ghouts sont le type de sol et la direction du vent de sable. Les formes du Ghout peuvent être classées en trois catégories.

II.3.1. Les Ghouts circulaires

La mise en valeur de ce genre se retrouve dans toute la partie sud-ouest du Souf (MihOuensa, Oued Turk, etc.)(Fig.11). Selon un rapport technique de 1953, si la profondeur

d'excavation dépasse 7 mètres et que la hauteur du talus est supérieure à 15 mètres, la construction d'un nouveau gouffre devient impossible à exploiter (BTP, 1953). Les caractéristiques et les conditions du sud-ouest de la région du Souf sont légèrement différentes. On y trouve une nappe moins profonde de 5 à 10 mètres, des terrains sablonneux peu encroutés, mais une grande mobilité du matériel et une grande sensibilité à tous les types de vents, ce qui explique la présence de petites dunes motrices. C'est moins l'accès à l'eau qui pose problème que la gestion des flux éoliens (Fig.11).

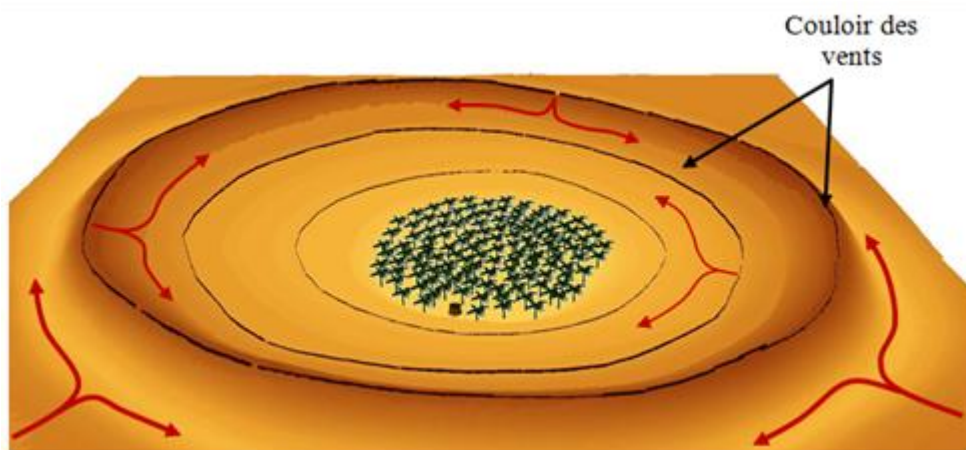


Figure 11. Schéma présentant un Ghout dans la zone éolienne (Miloudi, 2017).

Les vents sont présents dans cette zone et viennent de toutes les directions ; le plus préjudiciable pour les dattes est le vent du sud et du sud-ouest, tels que l'Oued Alenda, MihOuensa, Oued Turk, etc. Et le plus préjudiciable aux aménagements, car il est fréquent et puissant. On trouve aussi le vent de mer « Bahri », qui vient du nord-est (environ 300 km depuis le golfe de Gabes-Tunisie). Au fond, on trouve des palmiers dont le sommet n'excède pas les crêtes de sable. Les crêtes de sable circulaires qui entourent ce fond d'entonnoir (Fig. 11) sont étroitement liées entre elles. C'est ce qu'on nomme un "Ghout". Il s'agit de l'unité fondamentale de l'aménagement du Souf.

II.3.2. Ghouts allongés

Le Soufi est spécialisé dans le mécanisme de houe, avec l'aide d'un âne pour les déplacements. De plus, il est à la recherche de terrains très meubles, sablonneux, sans encroutement gypseux pour excaver le site de ses palmiers (Fig. 12). Les encroutements sont minces et friables dans la partie sud ou la branche sud et sud-est du Souf (El Oued, Nakhla, Robbah, etc.), où le sable est relativement homogène.

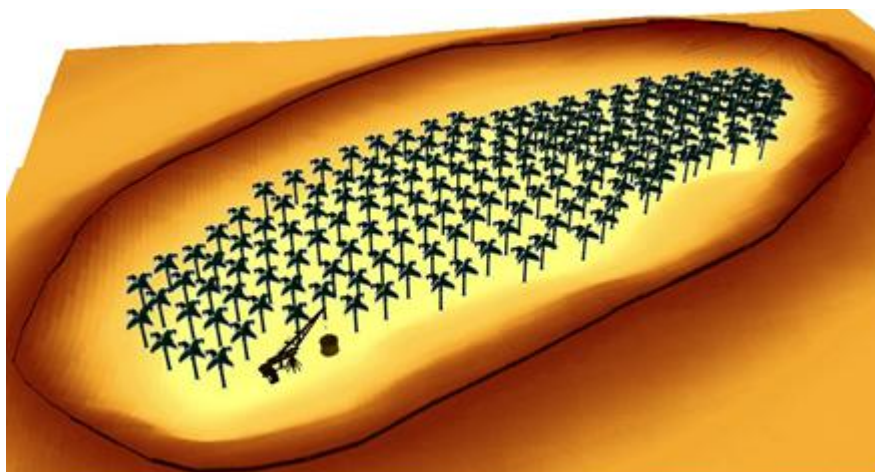


Figure 12. Schéma présentant un Ghout allongé (Miloudi, 2017).

La contrainte réside dans la profondeur de la nappe, qui peut atteindre environ 10 mètres, voire plus de 15 mètres parfois ; la couche de sable à évacuer et à emporter vers le haut du gouffre pour former la crête. Le Soufi a de la patience pour créer un Ghout, et pour faciliter les travaux d'excavation il choisit une zone de sable « libre » en position basse dans la topographie (Houd ; dépression naturelle), de façon à limiter le volume à excaver. Les Ghouts sont de taille importante : de 1,5 à 3 hectares pour l'unité d'aménagement, et peuvent atteindre jusqu'à 5 hectares. Il y a environ 100 palmiers, parfois plus de 200. Les opérations d'excavation et de transport de sable de ces grandes fosses sont considérables, réalisées en collaboration par 2 ou 3 familles, c'est-à-dire 5 à 10 agriculteurs qui se partagent ensuite le fond du fosse au prorata du travail effectué.

II.3.3. Ghouts rectangulaires

On trouve ce genre de Ghouts dans les régions du nord du Souf : Hassi Khalifa, Magrane, Hassani A-Kerim, Reguiba. Ils sont plus nombreux que les Ghouts profonds, et il est probable qu'ils ont un avenir plus prometteur qu'eux, car ils peuvent être modernisés. Les paysages de la moitié nord du Souf sont marqués par des cratères peu profonds, avec des escarpements, qui sont d'un rougeâtre éclatant. Ces cratères peu enfoncés dans le sol sont appelés "Houd" par les « Souafa » (Fig. 13). Il s'agit d'une particularité de cette partie du Souf : l'Erg, qui est sableux, possède dans son sous-sol un encroustement gypseux appelé Louss, créé par les roses des sables.



Figure 13. Schéma présentant un Ghout rectangulaire (Miloudi, 2017).

La profondeur de la nappe phréatique varie de 6 à 12 mètres, et dans certains cas elle est sous pression (semi-artésienne). Le défi pour l'agriculteur réside dans le fait que la couche est recouverte de matériaux solides et compacts, et a généralement une épaisseur de 2 à 5 mètres (Fig. 14).

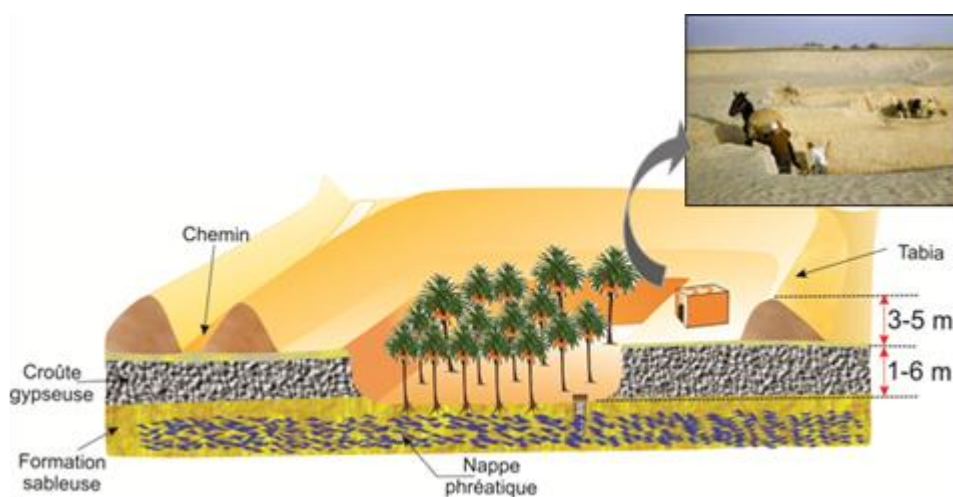


Figure 14. Coupe d'un Ghout rectangulaire (Miloudi, 2017).

Comme ailleurs, les cratères sont créés par le déblai d'excavation, ce qui leur confère quelques caractéristiques distinctives : des cratères plus petits, généralement carrés, avec des escarpements verticaux (Fig. 14), avec une entrée en pente douce ; une Tabia périphérique

composée de couches de roches. Ce genre de goût ne présente aucun risque de glissement de sable, ni d'ensablement éolien, c'est-à-dire aucune palissade.

II.4. Technique d'irrigation dans les Ghouts

En ce qui concerne l'origine de cette technique originale, on connaît l'origine et le parcours d'autres techniques hydrauliques. Par exemple, il est connu que la foggara est une technique originaire de l'Iran (qanât), et qu'elle a été étendue de manière progressive d'est en ouest à travers le Sahara jusqu'au Touat algérien (Cote Marc, 2006). Alors que l'essentiel de la technique du Ghout est consacré à la culture du palmier, il y a souvent des cultures secondaires qui ne constituent qu'une production limitée destinée presque exclusivement à la maison.

De petits jardins irrigués, situés au milieu de ces plantations ou sur les côtés, produisent des légumes, du Henné, etc. L'irrigation est effectuée grâce au Ghôtara traditionnel (prononcer Rhuôtara), similaire au Chadouf égyptien : un levier équipé d'un contrepoids permet de remonter le seau en cuir ou en toile rempli de liquide. En d'autres mots, le Ghôtara se compose de deux poteaux qui supportent une pièce de bois chargée à l'un des bouts d'une pierre, atteignant un peu plus que l'équilibre à la peau de bouc que l'on accroche à l'autre extrémité lorsqu'elle est pleine (Fig. 15). Tous les puits sont construits à partir de plâtre local et sont plus ou moins profonds, selon les endroits.

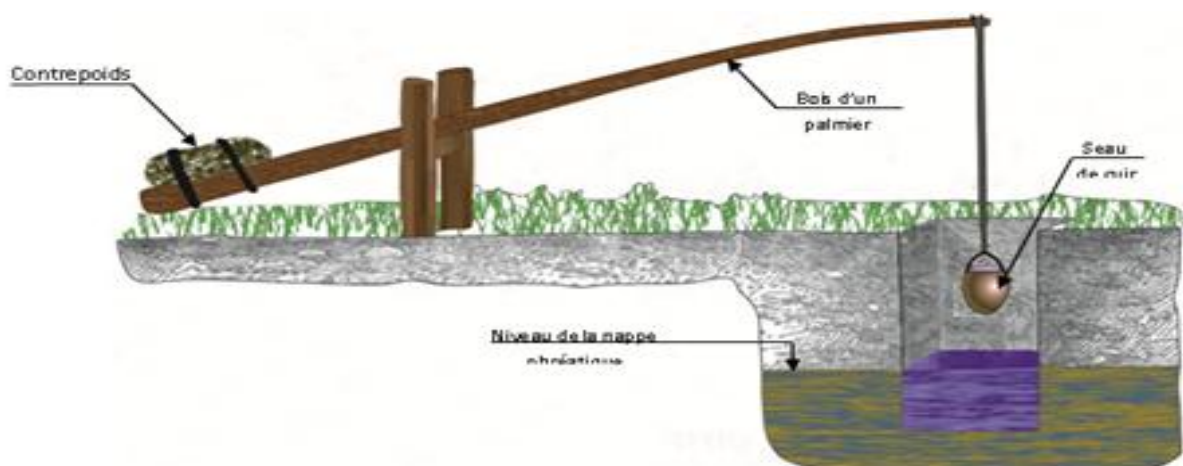


Figure 15. Balancier (Ghôtara) pour l'irrigation dans un Ghout (Miloudi, 2017).

Le jardin est arrosé par immersion, à l'aide de Séguias (prononcer Séguia). Il est divisé en un grand nombre de « carrés » (Mizeb) mesurant en moyenne 1 à 3 m sur 0,5 m. Pour

établir une Séguia, on commence par la faire en sable. Ensuite le sable est recouvert d'une légère couche de plâtre (Fig.16). Les vannes sont de simples bouchons de chiffon ou bouchons construits à partir du Lif de palmiers.

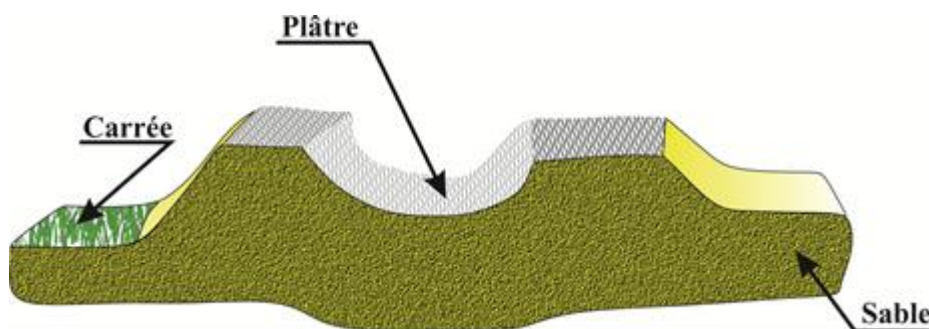


Figure 16. Coupe d'une Séguia (Miloudi, 2017).

Il n'y a pas d'espace perdu. Il est constamment cherché à accroître le rendement. Le seul engrais local, le crottin de chameau, est également cueilli et conservé avec soin. Cette culture intensive est toujours réalisée en utilisant les méthodes et les techniques traditionnelles, mais a néanmoins subi des évolutions récemment.

II.5. Protection des Ghouts

La question de l'ensablement des Ghouts est souvent considérée de façon bien abstraite. Dans le Souf toute une science des techniques éoliennes, qui se manifeste déjà dans les cratères profonds, et atteint ici la perfection. Certains vieux agriculteurs spécialistes des palissades sont consultés par leur voisins (Fig. 16), tant pour leur localisation que pour leur réalisation. Ces palissades exigent également un entretien périodique (tous les 2 ou 3 ans). Cette lutte est très importante car le sable, poussé par le vent, a tendance à envahir la palmeraie. Elle consiste à établir des barrières : haies de Djérid autour de la palmeraie (Fig. 17), les Ghouts rapprochés se protègent mieux les uns les autres contre les vents, ils sont organisés en ensembles coalescents. Les Soufis jouent avec le vent comme le marin pour conduire son voilier.



Figure 17. Des agriculteurs construisent une ceinture de Zerb (palissade) autour d'un Ghout

(https://qcat.wocat.net/fr/wocat/approaches/view/approaches_4156/)

La pratique de l'utilisation des haies de morceaux de palmes, des Zerb et de leur disposition sont une véritable science (Fig. 17). La tradition se mêle à l'expérience des spécialistes, et en réalité, le même individu est responsable de coutumes techniques (principalement concernant les Zerb) et de coutumes juridiques (principalement concernant les conflits entre propriétaires mitoyens pour tous les travaux de culture).

II.6. Nouvel intrus agraire dans la région du Souf (mini pivot)

« Sans le palmier, nous n'aurions jamais existé », finissent toujours par dire les plus âgés, quand on les interroge sur la phoeniciculture dans la région du Souf. « La datte cultivée dans les Ghouts est unique au monde par son goût et ses qualités de conservation », indiquent, toute génération confondue, les habitants du Souf, les Souafas. La « datte Ghars » se conserve pendant trois ou quatre ans, sans difficulté, dans des greniers. Il se raconte même que pendant la seconde guerre mondiale, c'est elle qui a permis de sauver les habitants de la famine. Cependant, à partir des années 90, l'agriculture dans la région du Souf a connu une évolution dans sa typologie en raison de l'émergence d'un intrus dans le paysage Soufi, à savoir le mini pivot (Fig. 18).

Grâce à l'engagement des agriculteurs soutenus par l'État dans le cadre d'une approche participative, la zone saharienne d'El Oued est devenue la première région productrice de pommes de terre du pays.

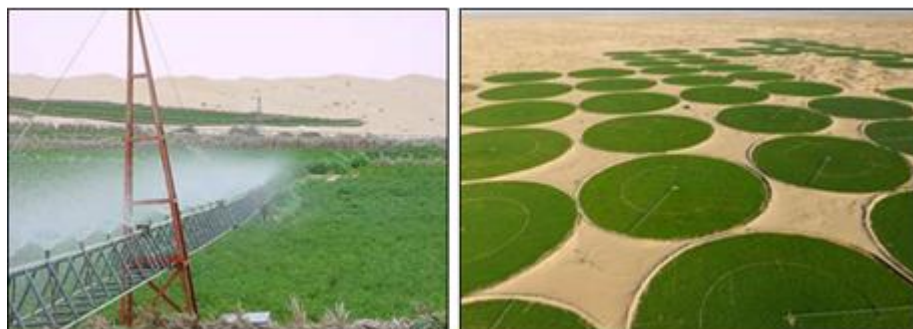


Figure 18. Fabrication artisanale d'un mini pivot.

Le retour de cette technique à leur mode et à leur échelle a été perçu comme intéressant par les soufis. D'abord, ils ont tenté de fabriquer de petits engins, irrigant 1/4, 1/3 ou 1/2 hectare, et fabriqués sur place à partir de tubes, de câbles d'acier, de roulements de voiture et d'engrenages de récupération. Il n'y avait que des asperseurs spécifiques. La plus courante dans la région est la taille du pivot de 50 à 80 mètres (0,78 à 2 hectares).

La route qui traverse la wilaya d'El Oued (sud-est) voit apparaître brusquement des cercles verts au milieu des dunes du grand Erg oriental. Les champs du désert, qui ont commencé à s'étendre au début des années 2000, sont devenus de plus en plus nombreux depuis. Les terres agricoles, presque inexistantes en 1993 avec seulement 200 hectares cultivés, s'étendent aujourd'hui à 33 000 hectares. Selon les données de la direction des services agricoles (D.S.A) d'El Oued en 2015, le nombre de producteurs a augmenté de 800 à près de 5 000 entre 2004 et 2014. La croissance de la filière a été si importante qu'en 2013, la wilaya est devenue la première région à produire des pommes de terre en Algérie, représentant 24 % des 5 millions de tonnes collectées dans le pays.

Dopées par ce soutien étatique, les pratiques agricoles ont considérablement évolué dans cette région de tradition phœniciculture (culture des palmiers). Les plus anciens Fellahs, spécialisés dans la datte, se sont ainsi lancés dans la pomme de terre. Et d'après le recensement de la D.S.A El Oued en 2015, on remarque une accélération exceptionnelle dans la production de la pomme de terre de 13000 tonnes en 2000 jusqu'à 1180000 tonnes en 2013 (Fig. 19).



Figure 19. Développement de la production des pommes de terre (D.S.A, 2015).

II.7. Problèmes menaçant l'existence des Ghouts

Depuis la fin du XIXe siècle et plus encore depuis 1930, les jardiniers du Souf sont témoins d'une nette baisse du niveau de leur nappe phréatique ; il semble même qu'ils aient connu, à partir de 1940, une diminution des eaux plus importante qu'auparavant. Au sud d'El Oued, elle est faible ou nulle, s'élève à 50 centimètres, à 1 mètre près de cette ville, à 1,50 mètre dans les environs de Kouinine, à 1,80 mètre près de Guemar et à plus de deux mètres non loin de Reguiba, au nord du Souf. Il y a donc une nette accentuation de la chute du sud vers le nord, au moins sur l'axe principal des palmeraies (Nesson, 1978).

Il est bien connu de la société Soufie, qui a dû faire face au rabattement lent de cette nappe au cours des derniers siècles et a dû développer des méthodes d'approfondissement des Ghouts et de « descente » du palmier (réalisée en creusant sous le palmier, et en le descendant avec des cordes, jusqu'à ce que ses racines atteignent à nouveau la nappe). En utilisant ces méthodes, le Soufi a réussi à accroître le nombre de palmiers, comme le confirme Najah A. (1970) (Fig. 20).

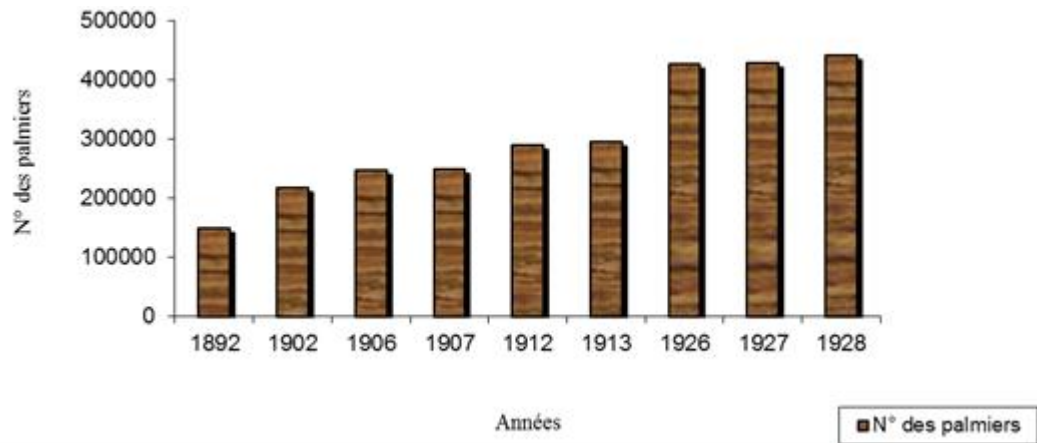


Figure 20. Le nombre de palmiers du Souf au début de XX^e siècle (Najah, 1970).

Outre le souci durable de la nappe phréatique, d'autres problèmes sont liés directement à l'existence des Ghouts.

La remontée des eaux souterraines: le fond des palmeraies est envahi par la nappe phréatique qui s'est élevée d'environ 1,50 mètre (Voisin, 2004). Il est vraiment triste de contempler des centaines de palmiers décédés (Fig. 21), dont les pieds sont immergés dans l'eau où pousse une végétation marécageuse.

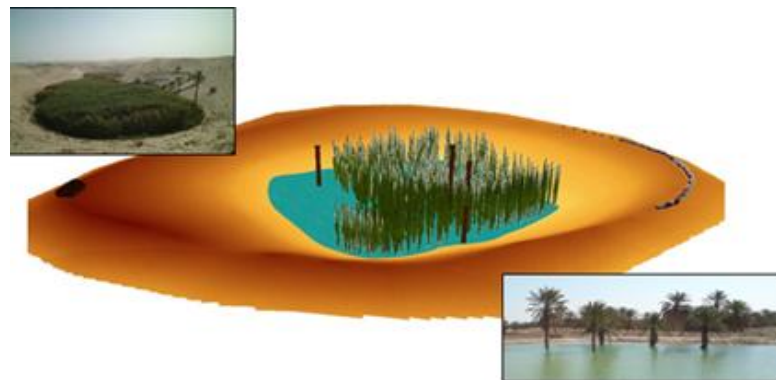


Figure 21. Un Ghout inondé (Miloudi, 2017).

- Problèmes liés aux réseaux d'alimentation en eau potable (Fig. 22):

L'augmentation de la population dans la région du Souf entraîne une augmentation des besoins en eau. Le système traditionnel d'alimentation en eau pour les habitants et les agriculteurs, fonctionnait en boucle fermée, avec des débits limités. Les forages profonds ont créé des crises supplémentaires, sans qu'aucune sortie n'ait été prévue. Le système est aujourd'hui troublé.



Figure 22. Exemples de fuites du réseau d'A.E.P dans la commune d'El Oued (Miloudi, 2017).

- Réseaux d'assainissement dépassé:

Dans la vallée du Souf, l'assainissement des eaux résiduaires est dominé par un assainissement individuel (ou autonome) pour toutes les villes de la vallée du Souf. Dans une ville d'environ 130 000 habitants, on a maintenu le système rural de fosses ou de puits perdus, avec un total de 36 265 fosses perdues dans la région avant 2012 (ONA, 2016). Ainsi, les débits élevés sont responsables de volumes d'eaux usées importants qui ne se résorbent pas en profondeur ; ils ne sont pas également évacués à l'extérieur du bassin hydraulique (Fig. 23). Ils vont se rapprocher de la nappe phréatique, qu'ils augmentent d'autant plus. Seules Guemar et El Oued sont des agglomérations qui disposent d'un réseau d'assainissement des eaux usées.

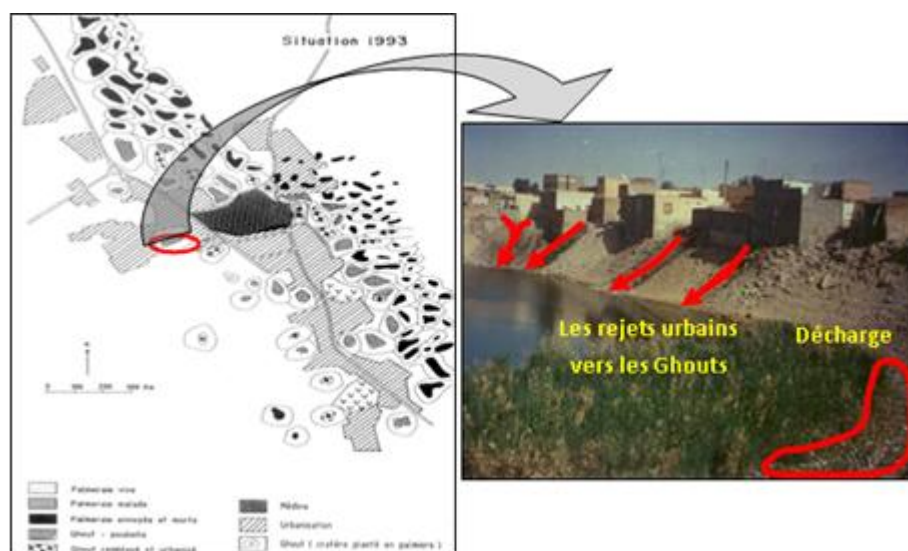


Figure 23. Situation d'un Ghout ennoyé complètement par les eaux usées (O.N.A, 2016).

- **Période du lancement des grands projets de la vallée du Souf:**

Depuis quinze (15) ans, nous avons contribué à la détresse d'une société agraire construite par des générations de Soufis, au prix d'un travail considérable. Il s'agit de la fondation économique et de l'environnement de vie d'une société et d'un paysage agraire qui meurt. Un développement urbain dans toutes les directions, au détriment des terres cultivées, en particulier les Ghouts.

- **Autres causes:**

On peut citer : l'exode rural et l'abondement des terres, nouvelles générations cherchant un autre mode de vie, conditions climatiques extrêmes (vagues de froid et de chaleur, vents chauds Chehili, etc.), changement d'activité agraire vers les nouvelles cultures (pommes de terre, tomates, etc.).

II.8. Un patrimoine classé par l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (F.A.O)

L'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (*Food and Agriculture Organisation* - FAO) a décidé en 2011 de classer le Ghout comme **patrimoine agricole universel**, en tant que système ingénieux, au vu de ce qu'il représente comme intérêt historique, socio-économique et culturel d'intérêt mondial (A.P.S, 2019). Le Ghout, ou pyramide inversée, est non seulement un mode cultural efficace mais aussi un site touristique par excellence, que ce soit pour le tourisme intérieur qu'étranger, au vu de ses caractéristiques singulières reflétant le génie de ses concepteurs qui ont permis l'émergence de palmeraies verdoyantes et source vivrière pour la population, dans un espace géographique saharien,

aride et hostile, mais aussi le développement d'une variété de datte de haute qualité connue sous l'appellation de "Baâli" (FAO, 2012).

II.9. Conclusions

Le système Ghout est un aménagement hydroagricole d'origine Soufi. C'est une technique qui s'adapte aux régions dunaires. La solution adoptée est, non de faire monter l'eau à la surface du sol et d'en irriguer les arbres, mais d'abaisser le niveau du sol, donc de creuser un trou afin que les racines du palmier qu'on plante soient au niveau de l'eau.

L'exploitation des nappes profondes et le semi-profond : le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal a provoqué vers les années quatre-vingt la remontée de la nappe dans toute la région de Souf. Un mégaprojet a été réalisé par les services publics pour atténuer l'effet de la remontée. Il s'agit d'épurer les eaux usées pour ensuite les refouler avec celles de drainage vers ChottHalloufa (au nord de la Wilaya). De plus, la dégradation des Ghouts existants est accélérée par le rabattement de la nappe phréatique, l'exode rural et les aménagements urbains intensifs. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter le rôle de l'intelligence artificielle (AI) dans la gestion et la préservation de ce patrimoine essentiel. Le modèle AI adopté ainsi que ses caractéristiques seront présentés en détails.

***Chapitre III : Les concepts de
l'IA dans la reconnaissance
des formes***

III.1. Introduction

L'observation de la Terre par télédétection spatiale, qui utilise les données des satellites pour surveiller et analyser la surface terrestre, a bénéficié de progrès importants grâce à l'introduction de l'intelligence artificielle (IA). La détection de formes, un secteur crucial de la télédétection, permet d'extraire des informations vitales à partir des images satellitaires, rendant possibles diverses applications comme la cartographie des terres agricoles et la surveillance des catastrophes naturelles. Les techniques d'IA, notamment l'apprentissage automatique (machine learning) et l'apprentissage profond (deep learning), jouent un rôle fondamental dans l'amélioration de la précision et de l'efficacité de ces analyses (IET, 2022).

III.2. L'apport de l'Intelligence Artificielle en télédétection spatiale

L'intelligence artificielle (IA) bouleverse le domaine de la télédétection spatiale en y insufflant de puissantes capacités de reconnaissance des formes. Cette technologie offre une multitude d'avantages, notamment une précision accrue, une efficacité décuplée et la découverte de nouveaux schémas invisibles à l'œil nu.

III 2.1. Techniques de l'intelligence artificielle employées

❖ Apprentissage automatique (Machine Learning)

- **Classification supervisée** : Algorithmes comme les forêts aléatoires (Random Forest), les SVM et les k-NN pour catégoriser les types de sols et de végétation à partir d'images satellitaires.
- **Classification non-supervisée** : Techniques non supervisées comme k-means et DBSCAN pour regrouper des pixels aux caractéristiques similaires, permettant l'identification de motifs inconnus dans les données.

❖ Apprentissage profond (Deep Learning)

- **Réseaux de neurones convolutifs (CNN)** : Puissants pour la reconnaissance de formes complexes et la classification d'images. Ils sont largement utilisés pour la détection d'objets, la segmentation sémantique et la classification des scènes dans les images satellitaires.
- **Réseaux de neurones récurrents (RNN)** : LSTM (Long Short-Term Memory) et RNN (Réseaux de Neurones Récurrents) analysent les séries temporelles de données, permettant de suivre les changements et les tendances dans les phénomènes observés.

III 2.2. Prétraitement des données

L'objectif principal du prétraitement est d'améliorer la qualité des données afin d'obtenir des résultats plus précis et fiables dans les modèles d'apprentissage automatique.

III 2.3. Détection d'anomalies

- ❖ Les techniques d'IA identifient les anomalies dans les données de télédétection, comme les catastrophes naturelles (incendies, inondations) ou les changements environnementaux (déforestation illégale).

III 2.4. Segmentation et analyse d'images

- ❖ Segmentation d'images: U-Net et Mask R-CNN divisent les images satellitaires en segments significatifs, pour une analyse détaillée des objets et des caractéristiques.

III 2.5. Détection d'objet

La détection d'objet est une technique utilisée en vision par ordinateur et en intelligence artificielle pour repérer et localiser des objets spécifiques dans des images ou des vidéos. Elle s'appuie sur des technologies avancées de traitement d'image et de machine learning, notamment les réseaux de neurones convolutifs (CNN) et les modèles d'apprentissage profond tels que R-CNN, YOLO (You Only Look Once) et SSD (Single Shot MultiBox Detector). (Girshick, 2015; Redmon et al., 2018).

III 2.6. Applications concrètes de l'IA en télédétection spatiale

❖ Surveillance environnementale

- Changements de couverture terrestre : Suivi des changements dans les forêts, les zones urbaines et les surfaces agricoles pour une meilleure gestion des ressources naturelles.
- Qualité de l'eau et santé des écosystèmes: Détection des variations dans les plans d'eau et la santé des écosystèmes aquatiques.

❖ Agriculture de précision

- Surveillance des cultures: Analyse des images satellitaires pour surveiller la santé des cultures, estimer les rendements et optimiser l'utilisation des ressources.
- Gestion des ressources: Aide les agriculteurs à gérer l'irrigation, les engrais et les pesticides de manière plus efficace.

❖ Gestion urbaine

- Planification urbaine: Données de télédétection assistées par l'IA pour la planification de l'expansion urbaine et la gestion des infrastructures.

- Suivi de l'expansion des villes: Suivi de l'évolution des zones urbaines pour une meilleure gestion de la croissance démographique et des ressources.[Ma et al., 2019; Reichstein et al., 2019; Zhu et al., 2017).

III.3. Modèles en question

❖ YOLO (You Only Look Once)

YOLO est une série de modèles de détection d'objets reconnus pour leur rapidité et leur capacité à traiter des images en temps réel. Les versions les plus récentes, telles que YOLOv8, ont amélioré la précision et l'efficacité.(Redmon et al., 2016; Ren et al., 2015).

❖ Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Networks)

Faster R-CNN combine un réseau de propositions de régions (RPN) avec un réseau de détection d'objets, offrant une précision élevée et une bonne performance pour les objets de petite taille.(Ren et al., 2015).

– Caractéristiques

1. RPN intégré: Génère des propositions de régions susceptibles de contenir des objets.
2. Réseau de détection: Affine ces propositions pour détecter les objets avec précision.

– Avantages

1. Précision élevée, excellente pour les objets de petite taille.
2. Performances robustes pour des images complexes.

– Inconvénients

1. Plus lent que les modèles YOLO.
2. Exigeant en termes de ressources computationnelles.

❖ Mask R-CNN

Mask R-CNN est une extension de Faster R-CNN ajoutant la segmentation d'instance, permettant de détecter les objets et de générer un masque de segmentation pour chaque instance (He et al., 2017).

– Caractéristiques

1. Segmentation d'instance : Génère des masques de segmentation pour chaque instance.
2. Précision très élevée : Idéal pour des applications nécessitant une détection et une segmentation précises.

– Avantages

1. Précision exceptionnelle.
2. Détection d'objets et segmentation d'instance.

– **Inconvénients**

1. Très exigeant en termes de calcul.
2. Plus lent, nécessitant des ressources matérielles importantes.

❖ **SSD (Single Shot MultiBox Detector)**

SSD utilise une seule étape de détection, similaire à YOLO, avec des caractéristiques de détection multi-échelle intégrées dans le réseau (Liu et al., 2016).

– **Caractéristiques**

1. Détection multi-échelle: Gère des objets de différentes tailles.
2. Architecture à une étape: Détecte directement les objets sans étape de propositions.

– **Avantages**

1. Rapidité.
2. Simplicité de conception.
3. Bonnes performances en temps réel.

– **Inconvénients**

1. Très exigeant en termes de calcul.
2. Plus lent, nécessitant des ressources matérielles importantes.

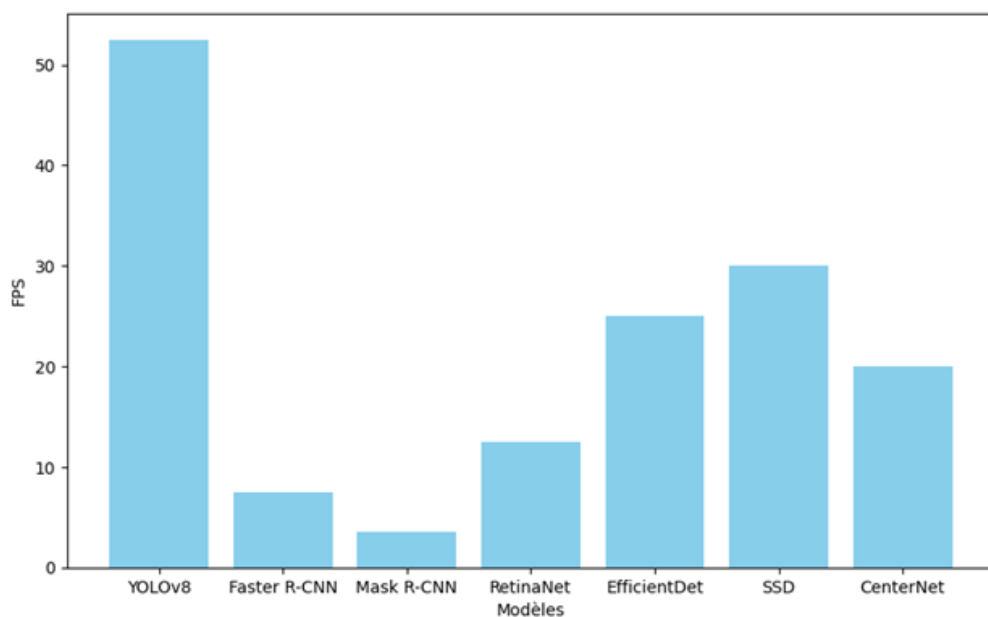


Figure 23. FPS des différents modèles de détection d'objets (Redmon et al., 2016).

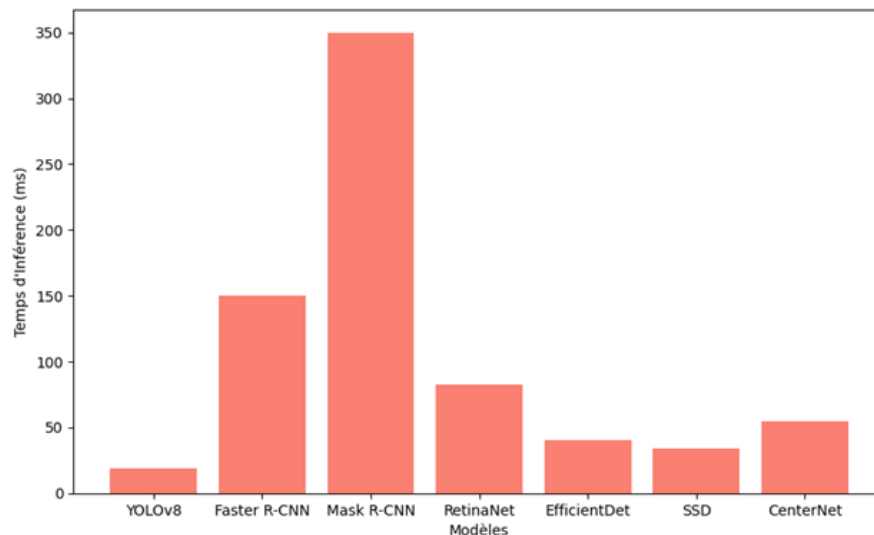


Figure 24. Temps d'inférence des différents modèles de détection d'objets (Redmon et al., 2016).

III.4. Critères de choix du modèle

Pour comprendre pourquoi YOLO pourrait être un excellent choix pour notre projet en télédétection, et comment il se compare à d'autres modèles, voici un aperçu détaillé des principales caractéristiques de YOLO et des critères de sélection pour privilégier ce modèle par rapport à d'autres.

III.4.1. Caractéristiques principales de YOLO

❖ Vitesse et efficacités

- Rapidité de détection: YOLO est conçu pour offrir une détection extrêmement rapide, capable de traiter des images en temps réel. Cette rapidité est essentielle pour des applications nécessitant une surveillance immédiate.
- Efficacité computationnelle: Ce modèle est optimisé pour une utilisation efficace des ressources matérielles, ce qui permet son déploiement sur des systèmes à capacités limitées, tels que les drones ou les capteurs embarqués.

❖ Précision

- Précision de la détection: YOLO offre une haute précision dans la détection d'objets, même dans des images complexes contenant des objets de différentes tailles et formes.
- Réduction des faux positifs: Grâce à ses mécanismes avancés de prédiction et de filtrage, YOLO minimise les faux positifs, ce qui est crucial pour des applications critiques comme la détection d'anomalies.

❖ **Architecture Avancée**

- **Backbone robuste:** Utilisation de backbones performants pour extraire des caractéristiques visuelles de haute qualité à différentes échelles.
- **Prédiction multi-échelle:** Capacité de détecter des objets de différentes tailles en utilisant des "ancres" adaptées à diverses échelles.

❖ **Flexibilité et adaptabilité**

- **Personnalisation des classes:** YOLO permet d'adapter le modèle à des ensembles de classes spécifiques selon les besoins du projet
- **Facilité d'entraînement:** Utilisation d'outils et de cadres (frameworks) populaires pour un entraînement facile et efficace.

❖ **Techniques d'amélioration des performances**

- **Augmentation des données:** Utilisation de techniques d'augmentation des données pour améliorer la généralisation et la robustesse du modèle.
- **Régularisation et optimisation:** Intégration de techniques de régularisation pour éviter le surapprentissage et optimiser la performance sur des ensembles de données variés.

III.4.2. Critères de sélection de YOLOv8 par rapport à d'autres versions

❖ **Les différentes versions de YOLO**

Les versions de YOLO ont constamment évolué, chacune introduisant de nouvelles améliorations et fonctionnalités pour optimiser la détection d'objets en termes de précision, vitesse et flexibilité. Voici un aperçu des principales différences entre les versions de YOLO

- **YOLOv1**

Architecture : Utilise une seule convolution pour prédire les boîtes englobantes et les probabilités de classe.

1. **Vitesse :** Très rapide, permettant le traitement des images en temps réel.
2. **Précision :** Moins précise que les versions suivantes, notamment pour les petits objets.
3. **Limitations :** Difficultés à localiser et à détecter les petits objets. Utilise un seul fichier de configuration.

- **YOLOv2**

1. **Améliorations :** Introduit la technique des ancres pour améliorer la précision de localisation. Utilise le clustering des boîtes englobantes pour générer des ancres et intègre Darknet-19 comme réseau de base.
2. **Vitesse et précision :** Meilleur équilibre entre vitesse et précision par rapport à YOLOv1.
3. **Capacité :** YOLO9000 peut détecter plus de 9000 classes d'objets.

- **YOLOv3**

1. **Architecture** : Utilise Darknet-53 avec des connexions résiduelles pour un réseau de base plus profond.
2. **Détection Multi-échelle** : Prédiction à trois échelles différentes, améliorant la détection d'objets de tailles variées.
3. **Vitesse et Précision** : Précision améliorée avec une légère diminution de la vitesse par rapport à YOLOv2.
4. **Flexibilité** : Meilleure capacité à détecter des objets dans des images complexes.

- **YOLOv4**

1. **Optimisations** : Introduit des optimisations telles que bag-of-freebies et bag-of-specials, améliorant la précision sans augmenter le coût de calcul.
2. **Architecture** : Utilise CSPDarknet53 et des techniques comme l'activation Mish, la mosaïque d'augmentation de données et le pooling pyramidal spatial (SPP).
3. **Vitesse et précision** : Précision significativement améliorée tout en maintenant une bonne vitesse.

- **YOLOv5**

1. **Différence Clé** : Développé par Ultralytics, utilisant PyTorch.
2. **Facilité d'Utilisation** : Intègre des outils pour faciliter l'entraînement et le déploiement.
3. **Flexibilité** : Propose des modèles de différentes tailles (YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l, YOLOv5x) pour un meilleur compromis entre vitesse et précision.
4. **Améliorations** : Amélioration des performances de détection et des fonctionnalités comme l'augmentation des données et l'apprentissage par transfert (Roboflow Blog, 2020).

- **YOLOv6**

1. **Introduction** : Lancé par Meituan.
2. **Innovations** : Introduction du backbone EfficientRep et du cou Rep-PAN. Découplage des têtes de classification et de régression des boîtes.
3. **Performances** : Supérieur à YOLOv5 en termes de mAP sur le dataset COCO, avec des vitesses d'inférence compétitives (Roboflow Blog, 2020).

- **YOLOv7**

1. **Introduction** : Lancé par WongKinYiu et AlexeyAB.
2. **Améliorations** : Intègre E-ELAN pour une meilleure efficacité des couches, techniques de redimensionnement de modèle et re-paramétrage pour une robustesse accrue.
3. **Performances** : Plus rapide et plus précis que les versions précédentes avec une faible latence et une haute efficacité computationnelle (Roboflow Blog, 2020).

- **YOLOv8**

YOLOv8, développé par Ultralytics, représente la dernière évolution de la famille YOLO. En tant que modèle de pointe (SOTA), YOLOv8 améliore les versions antérieures (Fig. 24) en ajoutant de nouvelles fonctionnalités et en optimisant la performance, la flexibilité et l'efficacité. Il prend en charge une large gamme de tâches de vision par ordinateur, telles que la détection, la segmentation, l'estimation de la pose, le suivi et la classification. Cette diversité fonctionnelle permet aux utilisateurs d'appliquer YOLOv8 à divers domaines et applications (Jocher et al., 2023 ; Ultralytics, 2023 ; Ultralytics, 2023 ; Ultralytics, 2023).

Version	Année de sortie	Modèles	Performance (mAP, FPS)
YOLOv1	2016	YOLOv1	mAP : 63.4% (VOC 2007), FPS : 45
YOLOv2 (YOLO9000)	2017	YOLOv2	mAP : 78.6% (VOC 2007), FPS : 67
YOLOv3	2018	YOLOv3	mAP : 57.9% (COCO), FPS : 30 (Tesla P100)
YOLOv4	2020	YOLOv4	mAP : 43.5% (COCO), FPS : 65 (Tesla V100)
YOLOv5	2020	YOLOv5s, YOLOv5m, YOLOv5l, YOLOv5x	mAP : 50.4% (COCO, YOLOv5x), FPS : 140 (YOLOv5s)
YOLOv6	2022	YOLOv6-N, YOLOv6-S, YOLOv6-M, YOLOv6-L	mAP : 52.3% (COCO, YOLOv6-L), FPS : 90 (YOLOv6-N)
YOLOv7	2022	YOLOv7, YOLOv7-Tiny	mAP : 51.2% (COCO), FPS : 161 (YOLOv7-Tiny)
YOLOv8	2023	YOLOv8n, YOLOv8s, YOLOv8m, YOLOv8l, YOLOv8x	mAP : 53.7% (COCO, YOLOv8x), FPS : Variable selon le modèle

Figure 25. Tableau des performances des différentes versions de YOLO (Bochkovskiy, 2020 ;Redmon, 2017 ;Redmon, 2018 ;Redmon,2016).

III.5. Pourquoi choisir YOLOV8 ?

III.5.1.Nature de l'application

Temps réel vs. Analyse différée : Si votre application nécessite des décisions en temps réel, YOLOv8 est un excellent choix grâce à sa rapidité. Pour des analyses différées avec des exigences de précision très élevées, d'autres modèles plus lents mais potentiellement plus précis peuvent être envisagés.

III.5.2.Complexité des données

1. **Complexité des scènes** :YOLOv8 est efficace pour les scènes complexes avec de nombreux objets. Pour des images particulièrement complexes, YOLOv8 offre un bon équilibre entre rapidité et précision.
2. **Taille des objets** :Si les objets à détecter varient considérablement en taille, la capacité de YOLOv8 à prédire à différentes échelles est avantageuse.

III.5.3.Contraintes matérielles

1. **Capacités de calcul** :Si vous disposez de ressources matérielles limitées, YOLOv8 est optimisé pour fonctionner sur des systèmes moins puissants tout en maintenant de bonnes performances.
2. **Déploiement embarqué** :Pour des applications sur des plateformes embarquées comme des drones ou des véhicules autonomes, l'efficacité de YOLOv8 est un atout majeur.

III.5.4.Ensemble de données disponibles

1. **Taille et diversité des données d'entraînement** :YOLOv8 peut être un bon choix si vous disposez d'un ensemble de données diversifié et de taille raisonnable, car il utilise efficacement les données disponibles pour améliorer la généralisation.
2. **Annotation et étiquetage des données** : La facilité d'entraînement de YOLOv8 peut aider à tirer parti d'ensembles de données bien annotés pour des performances optimales.

III.5.5.Exigences en précision

1. **Tolérance aux erreurs** :Si votre application tolère peu les erreurs de détection (par exemple, détection d'incendies de forêt, surveillance de zones critiques), la haute précision de YOLOv8 est un avantage.
2. **Comparaison avec d'autres modèles** :Pour des applications nécessitant une précision encore plus élevée, des modèles comme Mask R-CNN ou RetinaNet pourraient être envisagés, bien qu'ils soient généralement plus lents.

III.6. Conclusion

Ce chapitre a exploré en profondeur les concepts et techniques de l'intelligence artificielle appliqués à la reconnaissance des formes dans la télédétection spatiale. Il a mis en lumière les avancées significatives dans ce domaine, notamment grâce à l'évolution des modèles de détection d'objets, allant de YOLOv1 à YOLOv8. YOLOv8 se distingue particulièrement par sa rapidité, son efficacité en termes de calcul et sa capacité à détecter des objets avec précision et fiabilité dans des images complexes, en faisant un choix privilégié pour les applications de télédétection nécessitant une détection rapide et précise. Les comparaisons entre les différentes versions de YOLO ont montré que chaque itération apporte des améliorations en termes de précision et de vitesse, tout en introduisant de nouvelles fonctionnalités pour optimiser la détection d'objets. YOLOv8, par exemple, intègre divers backbones adaptables aux besoins spécifiques des applications et comprend des hyperparamètres configurables pour maximiser les performances.

Dans le chapitre suivant, chapitre quatre, nous présentons les résultats obtenus après l'application du modèles YOLOv8 sur les images satellitaires sélectionnées, afin de caractériser l'état des Ghouts dans notre région d'étude.

Chapitre IV: Résultats du modèle

IV.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous exposons les résultats obtenus à partir de l'exécution du modèle sélectionné pour la détection automatique des Ghouts (YOLOv8), ainsi que les tests effectués, les images satellitaires utilisées et les indices de performance. Des discussions et commentaires seront présentés par la suite.

IV.2. La détection des Ghouts par YOLOv8

IV.2.1. Sélection des images

Les images satellitaires de Google Earth Pro contenant les objets à détecter, ont été sélectionnées. Le critère d'avoir une diversité d'angles de vue et de conditions d'éclairage pour une meilleure robustesse du modèle est exigé. La figure 25 illustre un exemple d'une image satellitaire issue de la base de données Google Earth Pro, d'où figure une grande partie de la commune de Hassani Abdelkerim, pour l'année 2024.



Figure 26. Image de Google EarthPro de Hassani Abdelkarim en 2024.

IV.2.2. Annotation des données

La préparation des données passe par la plateforme Roboflow. Cette plateforme nous permet de procéder à l'annotation des objets (les Ghouts), c'est-à-dire donner une définition pour les différentes classes d'objets à détecter et à suivre par la suite.

L'outil d'annotation tel que « LabelImg » permet de marquer d'une façon manuelle les emplacements des objets à détecter, dans les images. Les annotations doivent inclure les coordonnées des boîtes englobantes autour de chaque objet. La figure 26 nous donne un aperçu sur cette opération.



Figure 27. Image qui représenter l'annotation d'image par Roboflow.

IV.2.3. Préparation du jeu de données

En suite, nous passons à la préparation du jeu de données. La division des données annotées en un ensemble d'entraînements, de validation et de test. Il est important d'avoir un nombre suffisant d'images dans chaque ensemble pour entraîner un modèle fiable et évaluer sa performance. La figure 27 illustre l'ensemble des images sélectionnées dans l'élaboration du modèle: Train 1392 images, Valid 365 images et pou le Test 204 images.

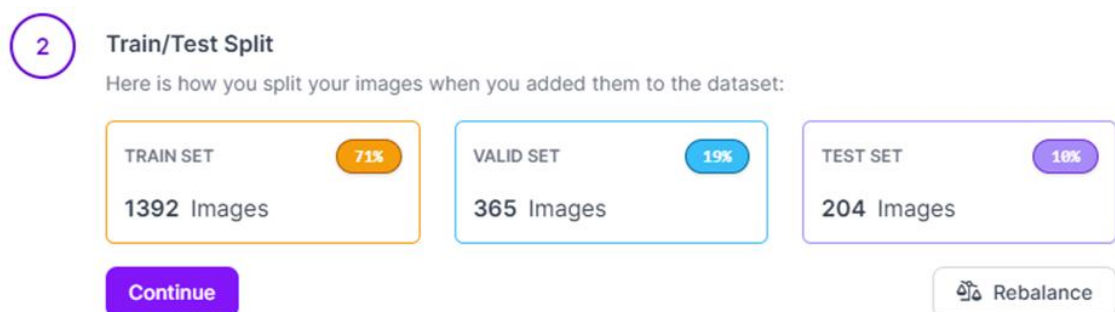


Figure 28. L'organisation des données dans Roboflow.

IV.3. Exécution du modèle YOLOv8

Premièrement, on doit télécharger un modèle YOLOv8 pré-entraîné ou on l'entraîne dès le début, en fonction de nos besoins. Assurez-vous de choisir la variante du modèle la mieux adaptée à votre tâche de détection d'objets.

IV.3.1. Entraînement du modèle

On utilise l'ensemble des entraînements pour entraîner notre modèle YOLOv8, afin de détecter les objets spécifiques (Les Ghouts), déjà annotés dans les images précédentes. Ensuite, ajustez les hyperparamètres du modèle et surveillez les métriques d'évaluation pour

optimiser les performances. La figure 28 nous donne un aperçu de l'entraînement du modèle, avec le langage de programmation Python, dans l'outil AI de Google, Google Colaboratory, connu sous le nom Colab.

TRAINING MODEL

[illegible]

Figure 29. Un code Python pour l'entraînement du modèle YOLOv8s.

IV.3.2. Validation du modèle

Le modèle est évalué sur l'ensemble de validation afin de vérifier sa capacité à généraliser de nouvelles données. En cas de besoin, ajustez le modèle afin d'améliorer ses performances. La figure 29 présente une illustration d'une compilation d'un code en Python afin de confirmer le modèle.

Validate Custom Model

```
In [14]: %cd {HOME}

!yolo task=detect mode=val model={HOME}/runs/detect/train/weights/best.pt
data={dataset.location}/data.yaml

/kaggle/working
Ultralytics YOLOv8.0.196 🚀 Python-3.10.13 torch-2.1.2 CUDA:0 (Tesla T
4, 15102MiB)
Model summary (fused): 168 layers, 11134098 parameters, 0 gradients, 2
8.5 GFLOPs
val: Scanning /kaggle/working/datasets/GHOUUTS-3/valid/labels.cache...
```

Figure 30. Un extrait d'un code Python pour valider le modèle YOLOv8.

Dans la figure 30, on trouve un ensemble de paramètres du modèle présenté. Pour chaque classe de l'ensemble de données, les informations suivantes sont fournies:

- **Classe** : Elle désigne le nom de la classe d'objets, par exemple "Ghouts", "voiture" ou "chien". "Ghout", pour notre cas d'étude.
- **Images** : Cette métrique t'indique le nombre d'images de l'ensemble de validation qui contiennent la classe d'objets.
- **Instances** : Ce chiffre indique le nombre de fois où la classe apparaît sur toutes les images de l'ensemble de validation.
- **Box(P, R, mAP50, mAP50-95)**: Cette métrique donne un aperçu des performances du modèle en matière de détection d'objets :
 - **P (Précision)** : La précision des objets détectés, indiquant combien de détections étaient correctes.
 - **R (Recall)** : La capacité du modèle à identifier toutes les instances d'objets dans les images.
 - **mAP50**: précision moyenne calculée à un seuil d'intersection sur union (IoU) de 0,50. C'est une mesure de la précision du modèle qui ne prend en compte que les détections "faciles".
 - **mAP50-95**: La moyenne de la précision moyenne calculée à différents seuils d'IoU, allant de 0,50 à 0,95. Elle donne une vue d'ensemble des performances du modèle à différents niveaux de difficulté de détection.

	Class	Images	Instances	Box(P	R
mAP50 m	all	421	21795	0.976	0.94

Figure 31. La performance (Accuracy) de la validation du modèle.

Ainsi, afin de détecter efficacement les objets, le modèle nous a fourni une précision extrêmement élevée (R = 0.976). Cela indique que le modèle a réussi à détecter efficacement les Ghouts.

IV.3.3. Évaluation du modèle

Cette phase consiste dans la réalisation des tests sur le modèle, afin d'évaluer sa précision, (R) son rappel (P) et d'autres indicateurs de performance. C'est-à-dire, explorer les résultats afin de repérer les secteurs où le modèle peut être renforcé. La figure 31, présente des graphiques d'entraînement et de validation du modèle, dans le but d'améliorer sa performance.

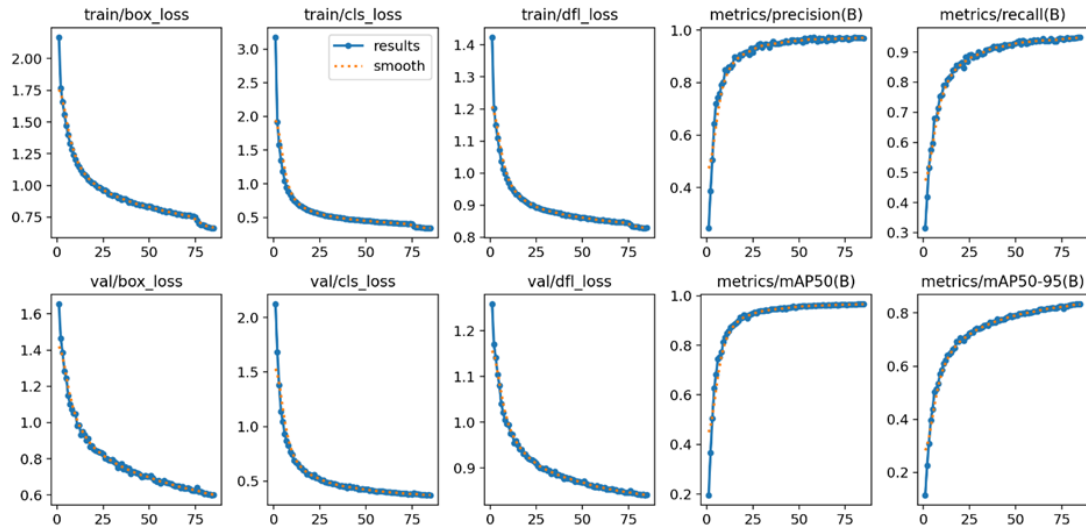


Figure 32. Graphiques d'entraînement et de validation du modèle.

IV.4. Interprétation et analyse des graphiques (Fig. 31)

Les graphiques fournis illustrent diverses mesures de performance du modèle YOLOv8, lors de sa phase d'entraînement et de validation. L'analyse des graphiques montre que le modèle YOLOv8 s'est amélioré de manière significative au cours de l'entraînement et de la validation. Il y a eu une diminution des pertes de boîte, de classe et DFL, ce qui suggère que le modèle prédisait des boîtes plus précises en ce qui concerne leur localisation, leur classification et leur dimensionnement. Il y a eu une augmentation des mesures de précision, de rappel, de mAP50 et de mAP50-95, ce qui suggère que le modèle détecte les objets avec une plus grande précision et complétude.

IV.4.1. Perte de boîte (train/box_loss)

Ce graphique montre l'évolution de la perte de boîte au cours de l'entraînement. La perte de boîte est une mesure de l'écart entre les boîtes prédites par le modèle et les boîtes d'annotation réelles. Une perte de boîte plus faible indique que le modèle prédit des boîtes plus précises. Dans le graphique, on observe que la perte de boîte diminue progressivement au cours de l'entraînement, ce qui indique que le modèle s'améliore en termes de localisation des objets.

IV.4.2. Perte de classe (train/cls_loss)

Ce graphique montre l'évolution de la perte de classe au cours de l'entraînement. La perte de classe est une mesure de l'écart entre les classes prédites par le modèle et les classes d'annotation réelles. Une perte de classe plus faible indique que le modèle prédit les classes des objets plus précisément. Dans le graphique, on observe que la perte de classe diminue

progressivement au cours de l'entraînement, ce qui indique que le modèle s'améliore en termes de classification des objets.

IV.4.3. Perte DFL (train/df_loss)

Ce graphique montre l'évolution de la perte DFL au cours de l'entraînement. La perte DFL est une mesure de la distance entre les prédictions du modèle et les boîtes d'annotation réelles. Une perte DFL plus faible indique que le modèle prédit des boîtes plus précises en termes de taille et de forme. Dans le graphique, on observe que la perte DFL diminue progressivement au cours de l'entraînement, ce qui indique que le modèle s'améliore en termes de localisation et de dimensionnement des objets. Concernant les graphiques de précision, on a:

IV.4.4. Précision (metrics/precision(B))

Ce graphique montre l'évolution de la précision au cours de la validation. La précision est une mesure de la proportion d'objets correctement détectés par le modèle. Une précision plus élevée indique que le modèle détecte les objets avec plus de précision. Dans le graphique, on observe que la précision augmente progressivement au cours de la validation, ce qui indique que le modèle s'améliore en termes de détection des objets.

IV.4.5. Rappel (metrics/recall(B))

Ce graphique montre l'évolution du rappel au cours de la validation. Le rappel est une mesure de la proportion d'objets réels détectés par le modèle. Un rappel plus élevé indique que le modèle détecte la plupart des objets réels. Dans le graphique, on observe que le rappel augmente progressivement au cours de la validation, ce qui indique que le modèle s'améliore en termes de détection complète des objets.

IV.4.6. mAP50 (metrics/mAP50(B))

Ce graphique montre l'évolution du mAP50 au cours de la validation. Le mAP50 est une mesure de la performance globale du modèle en termes de détection et de localisation des objets. Un mAP50 plus élevé indique que le modèle est plus performant. Dans le graphique, on observe que le mAP50 augmente progressivement au cours de la validation, ce qui indique que le modèle s'améliore globalement.

IV.4.7. mAP50-95 (metrics/mAP50-95(B))

Ce graphique montre l'évolution du mAP50-95 au cours de la validation. Le mAP50-95 est une mesure similaire au mAP50, mais qui prend en compte les objets de différentes tailles. Un mAP50-95 plus élevé indique que le modèle est performant pour détecter des objets de

toutes les tailles. Dans le graphique, on observe que le mAP50-95 augmente progressivement au cours de la validation, ce qui indique que le modèle s'améliore en termes de détection d'objets de toutes les tailles.

IV.5. Déploiement du modèle

Après avoir vérifié les performances du modèle, on le met en place afin de prédire des nouvelles images (ou des images récentes). Il est essentiel de vérifier régulièrement les performances du modèle en production et de le mettre à jour si besoin.

IV.6. Détection des Ghouts de Hassani Abdelkerim

Pour fournir une interprétation des deux images (Fig. 32 et Fig. 33) basées sur les détections effectuées avec Yolov8, nous avons analysé les informations dans chacune des images sélectionnées. Les images de deux dates différentes : une en 2007 et la deuxième en 2023, contiennent des annotations et des scores de confiance pour différents objets, principalement des Ghouts.

IV.6.1. Interprétation générale des deux images

IV.6.1.1. Image de 2007 (Fig. 32)

- Les annotations indiquent principalement des Ghouts.
- Les scores de confiance varient entre 0.26 et 0.92 pour les Ghouts pleins, ce qui montre une détection assez fiable.
- Les Ghouts partiels (indiqués en rose) ont des scores de confiance plus faibles, autour de 0.49 à 0.68.
- On observe une plus grande densité de Ghouts dans certaines zones spécifiques de l'image.

IV.6.1.2. Image de 2023 (Fig. 33)

- Les annotations montrent une diminution dans la catégorie des palmiers pleins.
- Egalement, les scores de confiance pour les palmiers varient entre 0.30 et 0.89, indiquant une bonne fiabilité de détection, avec une nette diminution.
- Les scores pour les Ghouts partiels varient entre 0.30 et 0.58.
- La distribution des annotations montre une expansion dans les zones où les Ghouts sont disparus.

IV.6.2. Comparaison entre 2007 et 2023

Le nombre de types de Ghouts détectés en 2007 est plus élevé, incluant un taux très élevé des Ghouts pleins et partiels et un taux faible disparus, ce qui n'était pas le cas en

2023. La densité des annotations semble plus élevée en 2007, indiquant peut-être une augmentation du couvert végétal des Ghouts, ou une amélioration de la détection.



Figure 33. Image du modèleYOLOv8de Hassani Abdelkerim, en 2007.

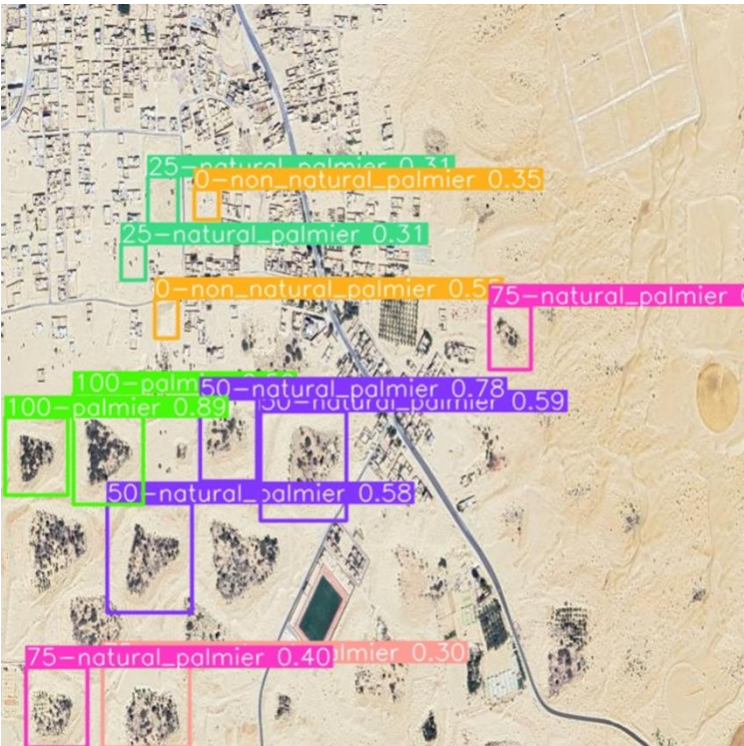


Figure 33. Image du modèleYOLOv8 de Hassani Abdelkerim, en 2023.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié comment les techniques de télédétection et l'intelligence artificielle (IA) ont été utilisées pour repérer et repérer les Ghouts dans la commune de Hassani Abdelkerim. Nous avons prouvé que l'utilisation de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle (le deeplearning), et précisément les modèles YOLOv8, permet de réaliser des analyses précises et efficaces à partir d'images satellitaires.

Grâce aux avancées de l'intelligence artificielle, notamment grâce aux réseaux de neurones convolutifs (CNN), la reconnaissance des formes et la détection des objets dans des environnements complexes ont été améliorées. En tant que modèle avancé, YOLOv8 s'est avéré très efficace en ce qui concerne la rapidité et la précision, des caractéristiques indispensables pour les applications en temps réel et les scénarios qui exigent une grande précision, comme la surveillance environnementale et la gestion des ressources naturelles.

L'acquisition des images, l'annotation des données et l'entraînement du modèle YOLOv8 ont été décrits en détail, démontrant une amélioration progressive des performances à travers des indicateurs tels que la perte de boîte, la perte de classe, la précision et le rappel. Les résultats obtenus confirment que YOLOv8 peut efficacement repérer les Ghouts à Hassani Abdelkerim, ce qui ouvre la voie à des applications potentielles dans d'autres domaines similaires. L'étude a montré une nette régression du couvert des Ghouts dans la zone étudiée, notamment une zone présentant une vulnérabilité forte envers la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique.

En résumé, l'incorporation de l'intelligence artificielle dans la télédétection spatiale constitue un progrès majeur dans l'analyse des données satellitaires, offrant ainsi des outils performants pour détecter et gérer les ressources naturelles. L'utilisation de ces technologies offre l'opportunité d'accroître les compétences de surveillance et de prise de décision dans différents secteurs environnementaux et géospatiaux.

Conclusions générales

La commune e Hassani Abdelkerim, située dans le sud-est de l'Algérie, est connue pour ses paysages uniques de Ghouts, et ces puits traditionnels qui permettent l'irrigation des oasis. Malheureusement, ces systèmes ancestraux font face à une dégradation inquiétante ces dernières années. La combinaison de facteurs tels que le surpompage des nappes phréatiques, la remontée de la nappe phréatique, l'expansion urbaine et l'abandon progressif des pratiques traditionnelles a entraîné l'assèchement et l'effondrement de nombreux Ghouts. Ce phénomène menace gravement l'équilibre fragile de l'oasis et la survie des cultures maraîchères et phoenicicoles qui en dépendent.

A travers ce projet de mémoire de fin d'étude, on a abordé plusieurs paramètres qui peuvent affecter l'environnement local de notre région d'étude, notamment dans la commune de Hassani Abdelkerim, de point de vu dégradation des Ghouts et leur détection et suivi par intelligence artificielle. L'intelligence artificielle a révolutionné le domaine de la détection d'objets, rendant cette tâche plus rapide, précise et évolutive que les méthodes traditionnelles. Un modèle de pointe comme YOLOv8 (You Only Look Once, version 8) illustre bien cette avancée et conçu pour détecter et classier en temps réel une grande variété d'objets dans des images ou des vidéos. Grâce à ses algorithmes d'apprentissage profond optimisés, YOLOv8 nous a permis d'identifier avec une grande fiabilité différentes classes de Ghouts : pleins, partiels et dégradés, tout en étant rapide et léger.

Les résultats du traitement des deux images, datant de 2007 et 2023, de la région de Hassani Abdelkerim, par le modèle YOLOv8, ont révélé que tous les Ghouts qui ont affiché un taux de développement de 100%, en 2007, ont connu une dégradation de 50%, sur l'image de 2023. Sachant que la région d'étude présente une vulnérabilité forte envers la pollution des eaux souterraines (81%), et 29% de vulnérabilité, classée moyenne.

Des efforts urgents de réhabilitation et de préservation de ce patrimoine hydraulique sont nécessaires pour assurer la pérennité de ces écosystèmes uniques au monde.

1. Recommandations

Suite aux différents résultats obtenus, et face aux changements qui ont affecté l'état des Ghouts existants, les autorités locales et supérieures doivent penser sérieusement à trouver des solutions ou trouver les moyens pour en préserver. On peut proposer les interventions et recommandations dans l'immédiat afin de sensibiliser les décideurs.

- Faire connaître à l'opinion publique et aux décideurs l'importance de préserver les Ghouts, afin de les protéger de la détérioration ou de la disparition.
- Programmer des séances, ateliers et conférences pour informer/former les responsables/écoliers sur les risques que peuvent causer la dégradation des Ghouts.

- Préserver les ressources en eaux disponibles et veiller à les protéger contre les gaspillages, les pertes et surtout contre la pollution.
- Aider les paysans à trouver les solutions adéquats contre leur problème (remontée et rabattement de la nappe, etc.).
- Le suivi permanente par images satellitaires, afin d'en programmer les interventions nécessaires, en temps réel.

Références bibliographiques

- A. Cornet, 1964. Introduction à l'Hydrogéologie du Sahara, Algérie, Revue Géographie Physique et de Géologie Dynamique, Vol. 6, N°1, pp. 5 – 72, 1964
- Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), 2005. Inventaire des forages d'eau de la Wilaya d'El Oued, la direction régionale Ouargla, Algérie 17 p.
- Algérie Presse Service (A.P.S), 2019. El-Oued: La phœniciculture dans le Ghout, un patrimoine agricole et touristique, 2019.
- Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y., & Liao, H.-Y. M. (2020). YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection. arXiv.
- Cote Marc, 2006. Si le Souf m'était conté, comment fait et se défait un paysage. Edition Media-plus, Constantine. 135 p.
- Direction des Services Agricoles de la Wilaya d'El Oued, 2015. Service des statistiques agricoles Rapports et canevas. Rapport publié en 2015.
- Girshick, R., 2015. Fast R-CNN. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 1440-1448.
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., & Girshick, R., 2017. "Mask R-CNN." Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV).
- IET Digital Library, 2022. Artificial Intelligence Applied to Satellite-based Remote Sensing Data for Earth Observation. Disponible sur IET Digital Library. »
- Jocher, G., Chaurasia, A., & Stoken, A., 2023. YOLO by Ultralytics. GitHub Repository. Retrieved from YOLOv8 GitHub.
- Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. Y., & Berg, A. C., 2016. "SSD: Single Shot MultiBox Detector." European Conference on Computer Vision (ECCV).
- Ma, L., Liu, Y., Zhang, X., Ye, Y., Yin, G., & Johnson, B. A., 2019. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 152, 166-177.
- NAJAH, A. 1970. Le Souf des Oasis, Éd. La maison des livres, Alger, 140 p.
- NESSON C. 1978. L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas-Sahara Algérien. Recherches sur l'Algérie / C. NESSON, D. Sari et P. Peillon. 7-9.
- Office National d'Assainissement (O.N.A), 2016. Direction d'El Oued, rapport technique publié en 2016.
- Office National de la Météorologie (O.N.M.), 2020. Station météorologique de Guemar, Algérie, 2020.

- MILOUDI, Abdelmouniam (2017). « Mécanismes et remèdes de la remontée des eaux dans la région d'El Oued : Impact sur l'environnement de la région ». Thèse de doctorat, université de Ouargla, 2017.
- Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (F.A.O), 2012. Algérie:R'fisse. Système Oasien Ghout, Algérie. Systèmes Ingénieux du Patrimoine Agricole Mondial (SIPAM), 2012.
- Redmon, J., & Farhadi, A., 2017. YOLO9000: Better, Faster, Stronger. CVPR.
- Redmon, J., & Farhadi, A., 2018. YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv preprint arXiv:1804.02767 .
- Redmon, J., & Farhadi, A., 2018. YOLOv3: An Incremental Improvement. arXiv.
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. 2016. “You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection.” Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A., 2016. You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. CVPR.
- Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N., & Prabhat., 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature, 566(7743), 195-204.
- Ren, S., He, K., Girshick, R., & Sun, J., 2015. “Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks.” Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). », <https://arxiv.org/abs/1506.01497>.
- Roboflow Blog. (n.d.), 2020 "YOLOv7: A Breakthrough in Real-Time Object Detection. [En ligne]. Disponible sur: <https://roboflow.com/model/yolov7>
- Roboflow Blog. (n.d.), 2020. “What is YOLOv6? The Ultimate Guide.” Roboflow. [En ligne]. Disponible sur: <https://roboflow.com/model/mt-yolov6>
- Roboflow Blog. (n.d.), 2020. “YOLOv5: The Ultimate Guide.” Roboflow.» [En ligne]. Disponible sur: <https://roboflow.com/model/yolov5>
- Ultralytics, 2023. YOLOv8 Documentation. Retrieved from YOLOv8 Documentation.
- Ultralytics, 2023. YOLOv8: The Next Generation of YOLO. Retrieved from Ultralytics YOLOv8.
- Ultralytics, 2023. YOLOv8: Versatile Applications and Use Cases. Retrieved from Ultralytics Use Cases.
- UNESCO. Projet ERESS, 1972. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultants du projet, Paris (1972), 100 p.

- Voisin A.R, 2004. Le Souf monographie, Edit El Walid. 319p.
- Voisin A.R, 2004. Le Souf monographie, Edit El Walid. 319p.
- Zhu, X. X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G. S., Zhang, L., Xu, F., &Fraundorfer, F., 2017. Deep learning in remote sensing: A comprehensive review and list of resources. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 5(4), 8-36.