



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Hydraulique

Option: CONCEPTION DES OUVRAGES HYDROTECHNIQUE

THEME :

**UNE APPROCHE SUR L'AMÉNAGEMENT DES FOGGARAS
CAS DE LA FOGGARA D'ANHIL.**

Présenté par :

KARAFI LALLA MERIEM

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms

Grade

Qualité

Zeroual Ayoub	M.CA	Président
Toumi Samir	M.C.B	Examineur
Bouri Djamel Eddine	M.C.B	Examineur
Laouche Nassim	M.C.B	Examineur
Remini Boualem	Professeur	Promoteur

Session: Septembre 2024

ملخص

تركز مذكرة نهاية الدراسة هذه على إعادة تأهيل الفقارة، وهي نظام سقي تقليدي أساسي لمنطقة القصر بولاية أدرار، وذلك باستخدام منهجية تجمع بين العمل الميداني والبحث الوثائقي. تحدد الدراسة الأسباب الرئيسية للتدهور، بما في ذلك العوامل الاجتماعية والاقتصادية، وتقتراح حلاً مستداماً. كشفت التحليلات أن مادة الجير هي المادة الأكثر مناسبة للتأهيل، مع التأكيد على الحاجة الملحة لاتخاذ تدابير وقائية وإدارة مستدامة للمياه مع تسليط الضوء على أهمية الحفاظ على هذا التراث الهيدروليكي في مواجهة التهديدات الحديثة وتدعو إلى زيادة الوعي لدى المجتمعات المحلية.

الكلمات المفتاحية: الفقارة، إعادة التأهيل، إعادة تحديد الأبعاد، تهيئة.

Résumé

Ce mémoire de fin d'étude se concentre sur la réhabilitation d'une foggara, un système d'irrigation traditionnel essentiel pour le ksar. Utilisant une approche méthodologique combinant travail de terrain et recherche documentaire, l'étude identifie les principales causes de dégradation, notamment socio-économiques, et propose des solutions durables. L'analyse révèle que la chaux est le matériau le plus approprié pour la réhabilitation, tout en soulignant le besoin urgent de mesures de protection et de gestion durable de l'eau. L'étude met en évidence l'importance de préserver ce patrimoine hydraulique face aux menaces modernes et appelle à une sensibilisation accrue des communautés locales.

Mots clés: Foggara, Réhabilitation, Redimensionnements, Aménagement.

Abstract

This study focuses on the rehabilitation of a Foggara, a traditional irrigation system essential for the ksar, using a methodological approach that combines fieldwork and documentary research. The study identifies the main causes of degradation, including socio-economic factors, and proposes sustainable solutions. The analysis reveals that lime is the most suitable material for rehabilitation while emphasizing the urgent need for protective measures and sustainable water management. The study highlights the importance of preserving this hydraulic heritage in the face of modern threats and calls for increased awareness among local communities.

Keywords: Foggara, Rehabilitation, Resizing, Reconstruction.

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire, **Pr. Remini, et Dr Boutadara** pour ses conseils avisés, son soutien constant et sa patience tout au long de mon projet. Sa rigueur intellectuelle et sa connaissance approfondie du sujet m'ont été d'une aide précieuse.

Je remercie également les membres du jury, pour avoir pris le temps de lire mon mémoire et de me faire part de leurs commentaires constructifs. Leurs suggestions d'amélioration m'ont permis de peaufiner mon travail et de le rendre plus complet.

Je suis reconnaissant envers mes parents, mes frères et ma sœur, et mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de mes études. Leur présence à mes côtés a été une source de motivation inestimable.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **M. Ansari, M. Benhamza, les staff du bureau d'étude hydraulique M. Mazouzi et Benhassan Nadjiba, Mr. Haidour Touhami, mes collègues** et à **Monsieur Kerthiou Elyes** pour leur générosité et leur soutien indéfectible. Je tiens également à les remercier chaleureusement pour leurs idées novatrices et leur soutien crucial qui ont largement contribué à la réussite de ce projet de MFE.

Enfin, je tiens à remercier les staff de l'**ANRH, DRE, DSA, INRA** et **AGIR** pour le soutien afin de réaliser de mon mémoire. Je suis également reconnaissant envers l'**École National Supérieur de l'Hydraulique** pour m'avoir offert un cadre de travail stimulant et propice à la recherche.

Ce mémoire de fin d'études représente l'aboutissement de plusieurs années de travail et de recherche. Je suis reconnaissant envers toutes les personnes qui m'ont accompagné et soutenu tout au long de ce parcours.

Dédicace

*Je dédie ce mémoire à **mes chers parents** ,mes frères **Said** et **Youcef** et ma sœur **Fati**, et à mes chères amies : **Noor, Aya, Samah, Salima, Radia, Manel, Majda, Ahlem.***

*Je dédie ce travail à mes grands-pères, qui ne sont plus parmi nous et mes tantes *Fethia* et son *marie, Mabrouka, Rahma, Khadra, Soumia, Karima* et mes oncles et mes cousines *Iman, Chaimaa, Amina, Kaouther, Eithar, Hssen, Houda, Hadjer, Asmaa, Souaad, Amel.**

Je dédie ce MFE à mes collègues du groupe d'option ouvrages hydrotechniques de l'année universitaire 2023/24.

Je dédie ce travail aux étudiants de Palestine qui n'ont pas pu achever leurs études et aux étudiants martyrs.

Table des matières :

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Chapitre 1: Généralités sur les Foggara et les travaux antérieures	
1.1 Introduction	2
1.2. Définition générale sur la Foggara	2
1.3. Historique	4
1.4. Composition de la Foggara	5
1.4.1. Le puits “Hasi”	5
1.4.2. La galerie “N’fad”	6
1.4.3. L’Aghisrou	6
1.4.4. Canal principale “Majra”	7
1.4.5. Peigne répartiteur “Kasria”	7
1.4.6. Rigole “Saguia”	8
1.4.7. Bassin “Madjen”	9
1.5. L’étymologie de la Foggara	10
1.5.1 Étymologie du Mot “Foggara”	10
1.5.2 La Foggara en Algérie	10
1.6 Contrôle et partage du débit de la Foggara	11
1.6.1 Outil de mesure	11
1.6.2 Unité de mesure	12
1.7 Type de foggara	13
1.8 Socio-économie de la Foggara	14
1.9 Le principe de fonctionnement	14
1.10 L’importance du système de la foggara	16
1.10.1 Importance locale	16
1.10.2 Importance nationale	16
1.10.3 Importance globale	16
1.11 L’impact de la dégradation des foggara	18
1.12 Khattara	19
1.12.1 Historique du Khattara	19
1.12.2 Principe de fonctionnement	19
1.12.3 Structure et géométrie	19
1.12.4 Importance et enjeux	20
1.13 Aflaj	20
1.13.1 Historique	20
1.13.2 Principe de fonctionnement	20
1.13.3 Classification	21
1.13.4 Enjeux de conservation	21
1.14 Le Qanat	21
1.14.1 Histoire et origine	21
1.14.2 Principe de fonctionnement	22
1.14.3 Importation et avantages	22
1.15 Comparaison de la foggara avec d’autres systèmes hydrique	23

1.15.3 Historique et contexte culturel	23
1.15.4 Principe de fonctionnement et structure	23
1.15.5 Géométrie et géologie	23
1.15.6 Comparaison avec les autres systèmes	23
1.16 Travaux antérieurs sur les foggaras	24
1.17 Conclusion	35

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude et méthodologie de travail

Introduction	36
2.1 Présentation de la Wilaya d'Adrar	36
2.2 Origine du mot Adrar	37
2.3 Présentation de la zone d'étude	38
2.4. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques	38
2.5.1 Hydrologie de la zone	39
2.5.2 Reliefs	39
2.5.3 Les conditions climatologiques	40
2.6 Les potentiels agricoles de la région	46
2.7 Conclusion	47

Chapitre 3 : l'hydraulique de la Foggara

3.1 Introduction	48
3.2 Description du système hydraulique de la Foggara	48
3.3 L'hydrométrie traditionnel	50
3.3.1 La mesure d'eau	50
3.3.2 L'unité de mesure de la Foggara	51
3.3.3 L'arithmétique de la Foggara	52
3.4. La situation actuelle de la Foggara	54
3.4.1 Situation hydraulique : Débit	54
3.4.2 Consommation de l'eau	54
3.4.3 Occupations des terres	54
3.4.4 Information sur la réhabilitation de la Foggara	54
3.4.5 L'état de la galerie	57
3.4.6 Etat de la structure	57
3.5 Conditions naturelle	57
3.5.1 Plan de développement	58
3.5.2 L'état de l'aménagement Foggara	58
3.6 La méthodologie	62
3.6.1 Évaluation préliminaire et diagnostique de la foggara	63
3.7 Conditions naturelles du terrain	69
3.7.1 La capacité de la nappe	69
3.7.2 L'hydrologie	69
3.7.2.1 Étude de l'homogénéité de la série pluviométrique	70
3.7.2.2 Ajustement de la série pluviométrique	72
3.7.2.2 a Ajustement à la loi Normale	73
3.7.2.2 b Ajustement à la loi Log-Normale	74
3.7.3 Test de validité d'un ajustement	75
3.8 Caractéristiques de l'eau de la foggara	76
3.9 La pente du terrain	77
3.10 Les besoin en eau	77
3.10.1 Débit caractéristique	78
3.10.2 Plan de distribution la foggara	78
3.11 Généralité hydraulique	79

3.12	Écoulement à surface libre	80
3.12.1	Type des écoulements	80
3.12.1.1	Validité dans le temps	80
3.12.1.1 a.	Écoulement permanent	80
3.12.1.1 b.	Écoulement non permanent	80
3.12.1.2	Validité spatial	81
3.12.1.2 a.	Écoulement uniforme	84
3.12.1.2 b.	Écoulement non uniforme	81
3.12.2	Régime d'écoulement	81
3.12.3	Canaux a ciel ouverts	83
3.12.3.1 a.	Canaux naturels	83
3.12.3.1 b.	Canaux artificiels	83
3.12.3.2	Les propriétés des canaux	83
3.12.3.2 a.	propriété géométrique	83
3.12.3.2 b.	propriété hydraulique	84
3.13	Dimensionnement	84
3.13.1	Conditions de l'écoulement uniforme	85
3.13.2	Les formules de calculs	85
3.13.2 i	Formule de Chezy	85
3.13.2. ii	Formule d'Agroskine	85
3.13.2. iii	Formule de Manning-Strickler	86
3.13.2. iv	Formule de Povlovsky	86
3.13.2. v	Formule de Bazin	86
3.14.	Le nombre de Reynolds	88
3.15	Calcul des pertes des charges	89
3.15.1	pertes des charges linéaires	89
3.15.2	pertes des charges singulières	89
3.16	Ajustement de débit	89
3.17	Les dimensions actuelles de la Foggara	91
3.18	Conclusion	95
Chapitre 4: L'étude des variantes		
4.1	Introduction	96
4.2	Les choix des variantes	96
4.2.1	Étude de variante 1	96
4.2.1. i	Les avantages	96
4.2.1. ii	Les inconvénients	97
4.2.1. iii	L'estimation des volumes et les dimensions	97
4.2.1. iv	Evaluations des coûts de réalisation	100
4.2	Étude de variante 2	104
4.2.2. i	Les avantages	104
4.2.2. ii	Les inconvénients	105
4.2.2. iii	Évaluation des coûts de réalisation	105
4.3	Étude de variante 3	108
4.3. i	Les avantages	108
4.3. ii	Les inconvénients	108
4.3. iii	Evaluations des coûts de réalisation	108
4.4	Résultats et discussions	114
4.5	Conclusion	115
Chapitre 5 : Organisation du chantier		
5.1	Introduction	116

5.2	Fonction et attribution des acteurs sur le chantier	116
5.2.1	Le maître de l'ouvrage	116
5.2.2	Le maître d'œuvre	117
5.2.3	L'entrepreneur	117
5.3	Installation du chantier	118
5.3.1	Installation destinée au personnels	118
5.3.2	L'installation pour le stockage des matériaux	118
5.3.2. i	Les agrégats	118
5.3.2. ii	Le ciment et l'acier	118
5.3.2. iii	L'eau utilisée au gâchage	118
5.3.2. iv	Le béton	118
5.3.2. v	L'énergie électrique	119
5.3.2. vi	L'alimentation en eau potable	119
5.3.2. vii	La fourniture des carburants	119
5.3.3	L'installation pour la réparation des équipements	119
5.3.4	Les installations dédiées à la préfabrication	119
5.4	Les moyens du chantier	119
5.4.1	Les moyens humains	119
5.4.2	/ Les équipements matériels	119
5.4.3	Les équipements de terrassement	120
5.5	Travaux de terrassement au sein de zone de construction	120
5.5.1	Exécutions des voies d'accès	120
5.5.2	Identification des équipements requis	120
5.5.3	Dérivation provisoire	120
5.5.4	Réalisation des travaux de bétonnages	121
5.5.5	Réalisation des tranchées	121
5.5.6	Installation du lit de sable	121
5.5.7	Vérification du compactage des tranchées	121
5.6	Planification	122
5.6.1	Les phases des travaux	122
5.6.2	Planning des travaux	123
5.6.2.1	Stratégies de planifications	123
5.6.2.1.1	Méthode des réseaux	123
5.6.2.1.1 a	Réseau à nœuds	124
5.6.2.1.1 b	Réseau à fléchés	124
5.6.2.2	Méthode graphique	124
5.6.2.2 a	Méthode de CC	124
5.6.2.2 b	Méthode du tableau	125
3.7	Conclusion	127
	Chapitre 6 : La complexité de la réhabilitation des foggaras	
6.1	Introduction	128
6.2	Réhabiliter une foggara est beaucoup plus compliqué qu'un autre ouvrage hydraulique	128
6.2.1	Quelques originalités d'une foggara Algérienne	128
6.2.2	Cas de la foggara d'Anhil	133
6.3	Recommandations à tenir pour exécuter le projet de réhabilitations de la foggara d'Anhil	135
6.4	Conclusion	137
	Conclusion général	138
	Les références bibliographiques	

INTRODUCTION GENERALE :

Dans le sud-ouest de l'Algérie, la région d'Adrar est un véritable laboratoire de l'adaptation humaine à un environnement désertique extrême. Face à des précipitations quasi nulles et des températures extrêmes, les populations locales ont développé, depuis des siècles, un système d'irrigation ingénieux : la foggara. Ce réseau de galeries souterraines permet de capter les eaux souterraines et de les acheminer vers les oasis, assurant ainsi l'approvisionnement en eau des populations et le développement de l'agriculture.

Ce mémoire explore en profondeur la restauration de la foggara d'Anhil, un système d'irrigation ancestral algérien. Après une présentation générale des foggaras et de leur importance historique, l'étude se concentre sur la foggara d'Anhil, analysant son état actuel et les défis liés à sa remise en état. La méthodologie adoptée s'appuie sur des principes hydrauliques pour dimensionner les éléments du réseau et comparer les résultats aux données existantes. Plusieurs solutions d'aménagement (béton, PVC, chaux) sont évaluées du point de vue technique et économique afin de sélectionner la plus adaptée au contexte local. Le mémoire aborde également l'organisation pratique du chantier, en soulignant les étapes clés et les contraintes à considérer. Enfin, il dresse un bilan des difficultés rencontrées et propose des recommandations pour une gestion durable de la foggara restaurée. Cette recherche met en évidence l'importance de préserver ce patrimoine hydraulique unique et offre une contribution précieuse à sa valorisation.

Pour sauvegarder ces foggaras l'état contribue au financement de leur réhabilitation. Cependant, l'absence des entreprises compétentes dans le domaine et la non consultation des oasiens ont contribué à la dégradation de ce patrimoine. Ce modeste mémoire d'ingénieur consiste à étudier le cas de réhabilitation de la foggara Anhil située dans la ville d'Adrar.

Chapitre 1:

GÉNÉRALITÉSETTRAVAUXANTERIEURSSURLESFOGARAS.

1.1 Introduction

Pendant plus de deux mille cinq cents ans, l'approvisionnement en eau par le biais de Foggaras ou de qanats a permis l'installation humaine dans des zones désertiques sur une partie extraordinairement vaste de la surface de la Terre. Une Foggara est un canal souterrain permettant d'obtenir des eaux souterraines dans les zones arides. Cette technique remonte aux empires achéménides ou assyriens et est encore utilisée dans certaines régions du monde aujourd'hui (Boustani, 2008).

Une Foggara prélève l'eau des aquifères dans les zones de piémont par l'intermédiaire de galeries souterraines qui drainent l'eau vers la surface ; les tunnels ont une pente plus faible que la surface du sol au-dessus, de sorte qu'ils finissent par intersecter la surface et l'eau émerge dans un canal, pour être recueillie dans un réservoir ou distribuée aux champs pour l'irrigation (Elyes Kerthiou)

La particularité de la Foggara est que la galerie est creusée entre des paires de puits verticaux situés à intervalles réguliers (entre 4 et 50 m), plutôt que d'être creusée horizontalement à partir du flanc de la colline. Le tracé de la Foggara peut donc être relevé à la surface, et la nécessité de relevés souterrains se limite à des tronçons de quelques mètres à la fois. Cette technique permet de créer un tunnel souterrain de plusieurs kilomètres de long avec un équipement de relevé relativement simple, car le gradient et le tracé peuvent être vérifiés à la surface tous les quelques mètres (English, 1968).

Les puits permettent l'accès et la ventilation pendant la construction et l'entretien ultérieur ; la terre est enlevée par leur intermédiaire et entassée autour de chaque puits pour les protéger de l'érosion par le ruissellement des eaux de pluie en surface. Ces sont les lignes de ces cercles de déblais autour des puits qui fournissent souvent la seule trace en surface des Foggaras souterraines, comme une ligne de cratères marchant à travers le paysage (Si Ahmed Kayyal).

2 Définition générale sur la foggara

La Foggara est un système traditionnel d'irrigation par galeries souterraines, utilisé dans les régions arides du Maghreb, en particulier en Algérie. Elle consiste en une galerie souterraine, creusée manuellement, qui permet de capter l'eau d'une nappe phréatique située sous la surface du sol (**fig.1.1**) (Remini, et al, 2014)

L'eau de la Foggara est ensuite acheminée vers les palmeraies et autres cultures. Sur le plan socio-économique, la Foggara a joué un rôle important dans le développement des oasis du Algérie. Elle a permis de rendre ces zones arides habitables et productives. La Foggara a

également contribué à la création d'emplois et à la diversification de l'économie des oasis (Remini, Kechad, 2012).

L'importance de la Foggara est aujourd'hui encore reconnue. Elle est un élément important du patrimoine culturel et environnemental du Algérie. La Foggara est également un système durable d'irrigation, qui permet d'économiser l'eau. La Foggara a une grande importance socio-économique. Elle permet aux populations des oasis d'avoir accès à une eau potable et d'irrigation. L'agriculture est favorisée par la Foggara, en particulier la culture de palmiers dattiers, qui est la principale source de revenus des habitants des oasis.

La population des Foggaras joue un rôle important dans la création d'emplois dans les oasis, en particulier dans les domaines de l'agriculture, de la construction et de l'entretien des Foggaras.

Depuis des siècles, le système d'irrigation Foggara a fait ses preuves. Elle est un élément clé du patrimoine culturel et environnemental du Algérie et contribue toujours au développement socio- économique des oasis (Dubost, Moguedet, 1998).

D'après le bulletin statistique des Foggaras faite par l'Observatoire de la Foggara, Au total 1890 Foggaras ont été recensées dans les régions du Touât (Adrar), du Gourara (Timimoune) et du Tidikelt (INSALH), dont 330 sont actives et 304 sont dégradées. Ce diagnostic a été réalisé par l'AGIR en collaboration avec trois directions régionales de l'environnement, la direction des services agricoles et des établissements publics, avec le soutien des associations actives des Foggaras. Plus, de 47 000 fellahs bénéficient des ressources hydriques des Foggaras.

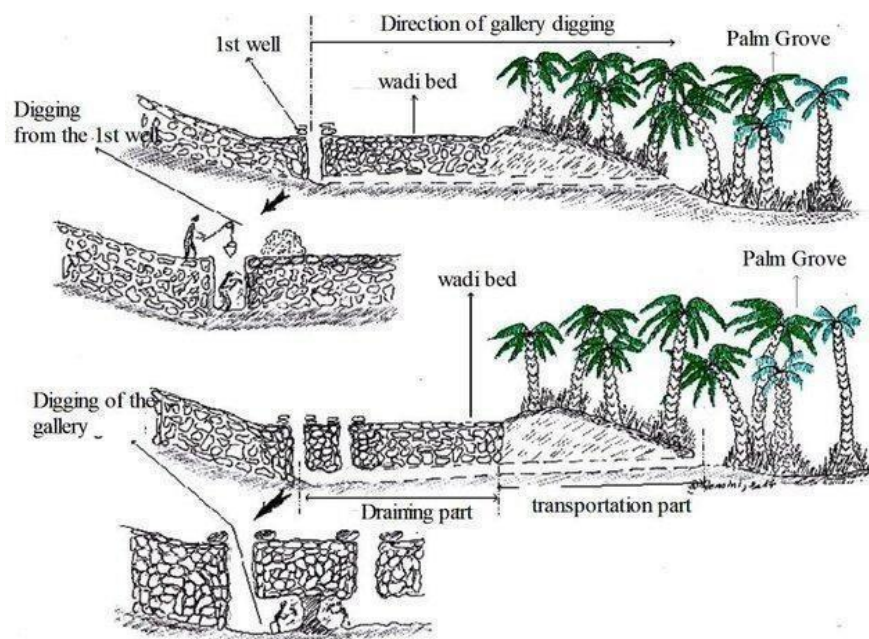


Figure 1.4.1.1: Schéma de la fouille de la foggara (Remini, 2019).

Les Foggaras (également connus sous le nom de qanats) sont d'anciens systèmes d'irrigation utilisés depuis des siècles dans les régions arides et semi-arides du monde entier, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient et en Asie centrale. Il s'agit d'un type de puits horizontal qui puise dans les aquifères souterrains et transporte l'eau vers la surface à travers une série de tunnels souterrains en pente douce. (Lightfoot, 2000).

Les origines exactes des Foggaras sont inconnues, mais on pense qu'elles ont été développées au Moyen-Orient dès le 8ème siècle avant JC. Ils se sont rapidement répandus dans d'autres parties du monde, y compris en Afrique du Nord, où ils ont joué un rôle vital dans le développement de l'agriculture.

Les Foggaras sont un exploit d'ingénierie remarquable, et ils ont permis aux gens de cultiver des terres qui seraient autrement trop sèches pour l'agriculture. Ils sont également un moyen très efficace d'utiliser l'eau, car ils perdent très peu à l'évaporation. Cependant, les Foggaras sont également très laborieuses à construire et à entretenir. (Remini, et al, 2014). En conséquence, leur utilisation a diminué dans de nombreuses régions du monde ces dernières années, car ils ont été remplacés par des systèmes d'irrigation plus modernes. Malgré ce déclin, les Foggaras sont toujours une source importante d'eau pour l'agriculture dans certaines parties du monde. En Algérie, par exemple, on estime à 20 000 le nombre de Foggaras encore utilisés.

Histoire de Foggara dans le contexte algérien :

Les Foggaras sont utilisées en Algérie depuis des siècles et font partie intégrante du patrimoine agricole du pays. Ils sont particulièrement importants dans les régions arides et semi-arides du sud, où ils sont la seule source d'eau pour de nombreuses personnes.

Les premiers Foggaras connus en Algérie ont été construits par le peuple berbère, arrivé dans la région au 2ème siècle avant JC. Les Berbères ont continué à construire des Foggaras pendant des siècles, et ils ont joué un rôle vital dans le développement de l'agriculture dans la région.

Au 11ème siècle, les Arabes ont envahi l'Algérie et ont introduit leurs propres techniques de construction de Foggaras. Les Arabes ont également introduit de nouvelles cultures, telles que les dattes et les oranges, qui étaient bien adaptées au climat algérien. La combinaison des techniques berbères et arabes a conduit au développement d'un système très sophistiqué de construction de Foggara. Les Foggaras algériens sont parmi les plus longs et les plus complexes au monde. Les Foggaras ont continué à être une source importante d'eau pour l'agriculture en Algérie jusqu'au 20ème siècle. Cependant, l'introduction de systèmes d'irrigation modernes dans les années 1950 a entraîné une baisse de leur utilisation. Malgré ce

déclin, les Foggaras restent une source importante d'eau pour l'agriculture dans certaines régions d'Algérie. Dans le sud, où il y a très peu de précipitations, les Foggaras sont souvent la seule source d'eau pour les cultures et le bétail.

Le gouvernement algérien s'est engagé à préserver le patrimoine Foggara du pays. Ces dernières années, il y a eu un certain nombre de projets de réhabilitation et de restauration d'anciens Foggaras. Le gouvernement s'efforce également de promouvoir l'utilisation des Foggaras comme source d'eau durable pour l'agriculture. (Bensaada, et Remini, 2016).

Les Foggaras sont un exploit d'ingénierie remarquable, et ils ont joué un rôle vital dans le développement de l'agriculture en Algérie. Ils constituent une partie importante du patrimoine du pays et le gouvernement algérien s'est engagé à les préserver pour les générations futures.

1.4. Composition de la foggara

La foggara se compose de plusieurs éléments, on trouve de l'amont vers l'aval:

1.4.1. Le Puits «Hassi»:

Les puits "Fouaha" (**fig.1.2**) sont la partie visible de la foggara. À l'intérieur des villes, ils deviennent un objet esthétique, ils servent à l'accès et au curage de la foggara (évacuation des déblais et remblais) et à l'aération de la foggara. Ils ne jouent aucun rôle hydraulique dans le fonctionnement de la foggara. La distance entre les puits n'est pas constante. Elle varie d'une région à l'autre (Gourrara, Touât et Tidikelt) et selon le type de terrain traversé. Elle varie entre 07 et 40 m de longueur. La profondeur des puits varie en fonction du niveau statique de la nappe et de la topographie de la région (Si Ahmed Kayyal).



Figure 1.2: un puits du Foggara Tamentit (2024).

1.4.1. La Galerie "N'fad":

La galerie ou "Nfad" (**fig.1.3**) est l'élément crucial de la foggara. C'est un conduit souterrain de plusieurs kilomètres de long, composé hydro-géologiquement de deux parties : une partie drainante, la plus importante de la foggara, car c'est celle qui pénètre dans l'aquifère et draine l'eau vers la partie non drainante qui la transporte vers le canal principal. La longueur totale du réseau ramifié de la galerie varie entre 0,07 et 15 km de galerie souterraine. La communication entre deux puits se fait à travers un tunnel. Il sert pour le passage à la galerie et l'accès aux puits le long de la galerie lors de l'entretien et du nettoyage de la foggara. Il mesure entre 0,5 et 1,5 m de largeur et 1 à 6 m de hauteur. L'analyse de l'alignement des foggaras montre que les galeries de la grande majorité. (Remini et Kechad, 2012).



Figure 1.3: vue en coup du N'fad d'une foggara (2024)

1.4.2. Aghoussro:

Cette section correspond à l'endroit où la galerie atteint la surface. Elle se situe entre le premier puits et le canal principal "Majra". Habituellement recouverte de plaquettes de ciment (**fig.1.4**) ou de roche avec de l'argile. La longueur de l'Aghisrou dépend de la profondeur du premier puits et du niveau du sol. Elle peut varier de quelques mètres à des centaines de mètres. (Remini et Achour, 2008).



Figure 1.4: l' Aghisrou Tamentit (2024)

1.4.1. Canal Principal "Majra":

Le canal principal "Majra" est un canal de forme rectangulaire utilisé pour acheminer l'eau vers le peigne répartiteur "Ksaria" (**fig.1.5**). Sa longueur peut varier de quelques mètres à quelques kilomètres. Autrefois construit en argile, ces canaux sont actuellement réalisés en ciment voire en PVC, afin de réduire les pertes par infiltration.



Figure 1.5: Majra de Tamentit (2024).

1.4.2. Peigne Répartiteur «Kasria»:

À la fin du canal principal «Majra», on trouve un partiteur appelé «Kasria» ou «Qasir» (**fig.1.6**). C'est un bassin de forme triangulaire ou rectangulaire construit en argile. Actuellement en ciment, il est équipé d'un dispositif pour ralentir la vitesse de l'eau avant de passer par le Machte « brosse », d'où chaque partie de l'eau est canalisée par une Seguia vers le jardin le plus éloigné dans la palmeraie. La « Kasria El Kebira » ou peigne principal, est le point de collecte et de distribution des eaux de la foggara. Comme l'eau de la foggara doit passer par le peigne principal pour être partagée équitablement entre les copropriétaires, on trouve également des Kasria secondaires et tertiaires pour répartir l'eau entre les copropriétaires.



Figure 1.6: Kasria principe du foggara de l'oasis de Timimoun (Remini, et al 2015).

1.4.1. Rigole «Seguia»:

Chaque copropriétaire achemine sa part d'eau vers son jardin par une rigole à ciel ouvert appelée «Seguia » (**fig.1.7**), construite en terre ou actuellement en ciment voire en PVC pour réduire les infiltrations, de forme circulaire ou rectangulaire. Les seguias se ramifient dans tous les sens dans la palmeraie.



Figure 1.7: Seguia de la foggara de Tamentit (2024).

1.4.1. Bassin «Madjen»:

L'eau dirigée vers le jardin du copropriétaire par une seguia est stockée dans un bassin appelé « Madjen » (**fig1.8**), de forme rectangulaire ou carrée, situé à un point élevé par rapport au niveau des terres irriguées, construit en ciment pour minimiser les pertes par infiltration. Il sert à l'alimentation du jardin à la fin du système de la Foggara (**fig.1.9**).



Figure 1.8: Un Madjen (2024).

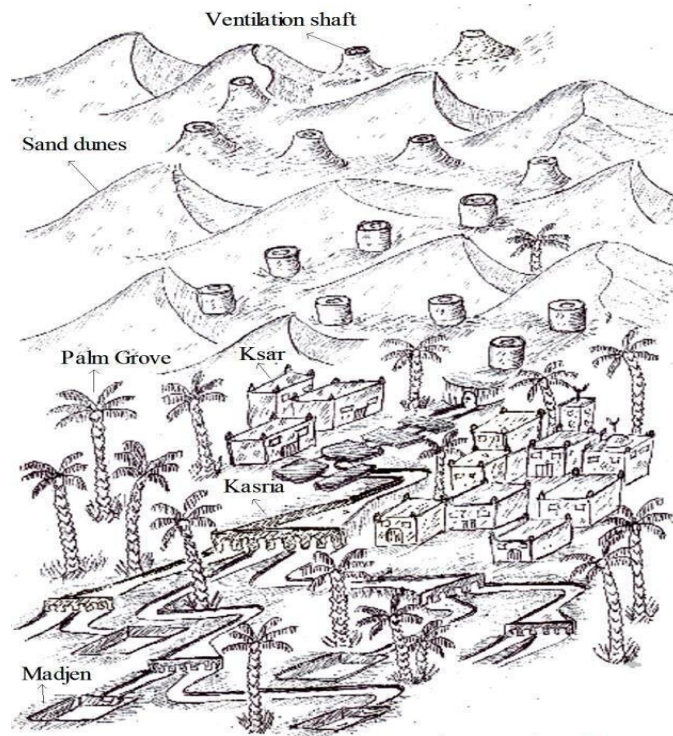


Figure 1.9: Diagramme synoptique de la foggara du Erg (Remini, 2022).

1.4. L'étymologie de la Foggara:

Les systèmes de foggara sont des merveilles hydrauliques anciennes, et leur étymologie et histoire sont fascinantes.

1.4.1. Étymologie du Mot “Foggara”:

Le terme “foggara” a des origines incertaines, mais il est utilisé dans plusieurs régions arides du monde. Voici quelques hypothèses :

En Algérie, le mot “foggara” pourrait être une altération du mot “fedjara”, qui signifie “donner une issue à l'eau” ou “la faire couler”.

Certains lient l'étymologie au verbe arabe “f'qr” (qui signifie “creuser”), avec une variante “f'ar” en hébreu. En Iran, où ces systèmes sont également courants, on les appelle “qanat”.

1.4.2. La Foggara en Algérie:

La foggara en Algérie est un patrimoine hydraulique mondial. Elle est utilisée depuis des siècles pour l'irrigation des oasis dans les régions arides du Sahara. Les foggaras algériennes captent l'eau des nappes phréatiques, des sources, des infiltrations ou des eaux de crue.

Elles sont essentielles pour la survie des communautés oasiennes et ont façonné le paysage et La vie dans ces régions.

Comparaison Mondiale:

D'autres pays utilisent des systèmes similaires:

Qanat en Iran. Khattara au Maroc.

Falaj au Sultanat d'Oman.

Kariz en Afghanistan et au Pakistan.

En somme, la foggara est un trésor d'ingéniosité humaine, permettant de puiser l'eau du sous-sol et de la distribuer dans des régions où chaque goutte compte.

1.4.3 Contrôle et partage du débit de la Foggara:

À la suite de chaque opération de nettoyage et d'entretien, une vérification et une répartition du débit de la foggara sont effectuées. Chaque foggara possède un registre "Zmam" (fig.1.10) dans lequel sont enregistrés les noms, les parts des copropriétaires ainsi que toute modification, achat, vente ou location d'une ou plusieurs parts d'eau de la foggara.

Le Chahed "Témoin" qui détient le registre "Zmam" annonce la mesure du débit d'une Kasria principale ou secondaire à la demande d'un ou de plusieurs copropriétaires. Ou bien après chaque opération de nettoyage et d'entretien d'une foggara.

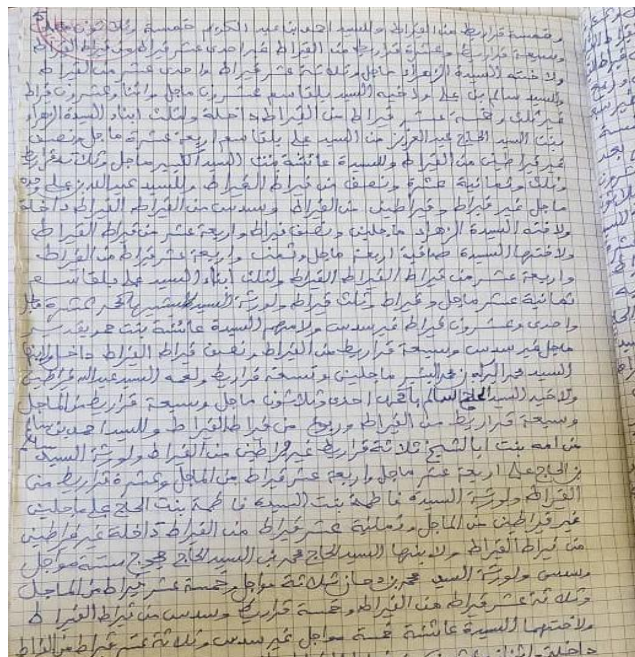


Figure I.10: Un Zmam d'une Foggara (2024).

1.6.1. Outil de mesure:

Pour mesurer le débit de la foggara, un outil traditionnel appelé "Louh" (fig.1.11) est utilisé dans la région de Gourara, "Chegfa ou Halafa" dans la région de Tidikelt et "Kiel Asfar ou Chegfa" dans le Touât. Il s'agit d'une plaque de cuivre de différentes formes et diamètres, plate au Touât de 57 x 18 cm et de forme cylindrique au Tidikelt de 15 cm de haut et de 25

à 30 cm de diamètre. L'outil est percé d'une rangée de trous de différents diamètres qui correspondent aux multiples et sous- multiples de l'unité de mesure.



Figure 1.11: Une plaque de jaugeage (Louh) utilisée dans l'oasis de Timimoun (Remini,2010).

1.6.2. Unité de mesure:

Le débit est mesuré différemment selon les régions, avec des noms tels que "kherga" dans le Tidikelt, Tmen, Majen, Sba, Aud, Kherga dans la Gourara et Sbaa, Madjen, Habba dans le Touât. Les unités de mesure varient d'une région à l'autre et même d'une foggara à l'autre dans le même ksar. Cela explique l'utilisation de différents outils pour mesurer le débit de chaque foggara. Par exemple, le débit est d'environ 0,058 l/s dans le Touât (Mehdaoui, 2011) et de 0,133 l/s dans le Tidikelt (Hamadi, 1982). Le tableau 1 ci-dessous présente les différents débits dans la région d'Adrar.

Tableau 1.1 : Unités de mesure du débit de la foggara d'après (Remini, 2008).

Palmeraie	Unité	Débit l/s
Timimoun	Tmen	0.0261
Deloul	Majen	0.0166
Charouine	Sbaa	0.0833
Tinerkouk	Aud	0.0633
Aougrouit	Kherga	0.0683
OuledSaid	Habba	0.0433

La valeur de la Habba est de 24 Kirat selon le tableau 1, tandis que la Habba Zerigt vaut également 24 Kirat. En raison de la grande valeur de l'eau, l'unité de mesure de l'or, le carat, a été utilisée pour la partager. La codification suivante est utilisée pour mesurer le débit. Le mesureur d'eau "Kiel El Ma" est nommé par la djemaa du ksar "comité du village" en raison de ses compétences. Il effectue la mesure avec l'aide d'un comptable "El Hassab" et un ou deux ouvriers. Kiel El Ma installe l'outil de mesure dans la Kasria El Kebira ou Seghira (la grande ou la petite peigne) ou dans une seguia pour mesurer le débit. Il fixe l'outil avec de l'argile et ouvre et ferme les différents trous de l'outil. Chaque trou correspond à une fraction du débit que le mesureur connaît parfaitement. Après plusieurs mesures, il transmet le débit de la foggara ou de la seguia au comptable "El Hassab" qui effectue les calculs de division du débit global entre les parts des copropriétaires et compte la part de chaque copropriétaire. À ce stade, Kiel El Ma effectue la répartition du débit entre les canaux. Ainsi, chaque copropriétaire reçoit sa part d'eau en continu 24h/24h. Il existe une autre méthode de partage du débit appelée "Nouba" où chaque copropriétaire reçoit un débit dans un temps déterminé (par unité de temps). Le débit initial de la foggara est déterminé par le débit de "Habba Zrig", qui représente le débit initial de la foggara après sa mise en service, où chaque propriétaire possède son propre débit de Habba Zrig. Après plusieurs années d'exploitation, le niveau de la nappe phréatique diminue, entraînant une baisse du débit. Ainsi, le débit mesuré de la foggara est appelé "Habba Maaboud", représentant le débit réel de la foggara, tandis que Habba Zrig correspond au débit fictif de la foggara

1.7. Type de Foggara :

Les types de foggaras varient en fonction de leur longueur, de leurs ramifications et de leur région d'existence. En langue locale, une grande foggara est appelée "Kebira" et une petite foggara est appelée "Seghira". Il n'y a pas de classification spécifique en termes de construction ou de creusement, on distingue :

Foggara de l'Erg : Il s'agit d'une foggara creusée près de l'Erg. En raison du déplacement des dunes de sable au fil des siècles, il est souvent difficile de localiser le puits amont de la foggara, recouvert de sable.

Foggara du plateau : La plupart des foggaras de la région d'Adrar sont alignées Est-Ouest, suivant le sens d'écoulement de la nappe du Continental Intercalaire et orientées vers le plateau de Tademait.

Foggara du Jardin : Cette foggara se trouve dans la palmeraie. De petite longueur, elle capte les eaux d'infiltration et de drainage des autres foggaras situées en amont.

Groupement de foggaras : Il est possible de trouver plusieurs foggaras regroupées en une seule foggara. Il s'agit de la réunion de deux à six foggaras au sein d'une même kasria.

1.8 Socio-économie de la Foggara :

L'analyse socio-économique de la région met en lumière la prédominance de l'agriculture, secteur étroitement lié à l'accès à l'eau. Cependant, les débits d'eau des foggaras se révèlent insuffisants, compromettant ainsi l'irrigation adéquate et rationnelle des terres sur lesquelles dépendent les 140 000 habitants. De surcroît, les coûts élevés d'entretien des foggaras impactent significativement le prix du mètre cube d'eau extrait par ce moyen. Dans le contexte actuel, où l'agriculture représente le socle de l'économie régionale, son essoufflement est imminent sans interventions rapides et efficaces. Afin de redresser cette situation critique, il est impératif de répondre aux besoins en eau indispensables à une irrigation appropriée tout en réduisant le coût de cette ressource cruciale.

Une caractéristique marquante du Gourara réside dans la présence d'une dépression s'étendant sur environ 80 km, orientée du sud-ouest au nord-est, et comprenant une vaste sebkha. L'agriculture demeure l'activité prédominante, soutenue par un système d'irrigation par foggara. Timimoune exerce une influence significative par rapport aux autres Daïras, du fait de son statut de vieille capitale, de commune et de daïra.

L'activité industrielle et commerciale se concentre à Timimoune, tandis que le tourisme occupe une place privilégiée dans la région. Les principales activités économiques englobent l'agriculture, l'industrie, le commerce, ainsi que le tourisme.

1.9. Le principe de fonctionnement

Le principe est simple si la topographie de la région présente un relief provoquant une inflexion du profil piézométrique des nappes libres, des aquifères locaux qui ne trouvent d'exutoires que dans les zones dépressionnaires. La création d'une Foggara n'est possible que lorsque le toit de la nappe se situe une cote supérieure aux zones à alimenter. La partie en amont de la Foggara pénètre sous la surface de la nappe, par contre la partie en aval achemine l'eau vers les palmerais (**fig.1.12**). À la sortie de la Foggara, l'eau est canalisée jusqu'à un partiteur en forme de peigne construit en pierres et en argile, dont le rôle est de la répartir selon des proportions données. L'eau est divisée et canalisée par une série des canaux en argiles vers les terrains à irriguer. À différents niveaux de la palmeraie, l'eau est à nouveau divisée par l'autre peignes et conduite vers les parcelles par des canaux plus petits, les canaux parcourent ainsi un réseau de distribution très dense dont les ramifications se terminent dans un bassin de collecte appelé le Madjen. Le bassin de récupération est utilisé pour régulariser

l'eau qui arrive en mince filets liquides et qui est distribuée en quantité suffisante pour l'irrigation.

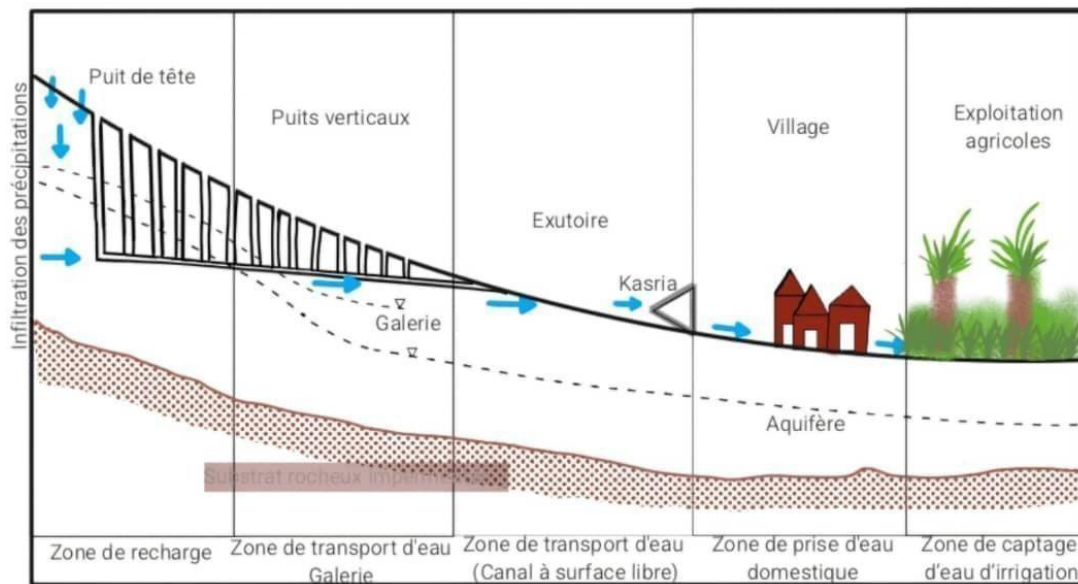


Figure 1.12 : Schéma descriptive du système de la Foggara.

Définitions de schéma :

Le système de foggara est composé de plusieurs éléments interconnectés, chacun jouant un rôle crucial dans le fonctionnement global du système d'irrigation. Le puits de tête, situé à l'extrémité amont, capte l'eau souterraine (Remini et al,2010), tandis que les puits verticaux permettent l'accès, l'aération et l'entretien de la galerie (Bouzaher et Lalouani, 2015). La galerie de foggara, un tunnel souterrain, transporte l'eau de la zone de captage vers la surface, aboutissant à l'exutoire (Ahmadi et al,2010). Le bassin de partage ou "kasria", généralement construit en béton, contrôle la distribution de l'eau (Idda et al,2017). La zone de recharge et de production d'eau, située en amont, alimente l'aquifère par infiltration des précipitations ou des écoulements de surface (Remini et Kechad, 2012). La galerie se divise en une zone adductrice, où des infiltrations peuvent se produire, et une zone de transport à ciel ouvert (Remini et Achour, 2008). Des zones spécifiques sont dédiées aux prises d'eau domestique et d'irrigation, cette dernière étant située en aval du canal principal ou "Aghoussro" (Bouzaher et Lalouani, 2015). L'aquifère, caractérisé par une forte porosité et perméabilité, joue un rôle essentiel dans le stockage de l'eau souterraine (Ahmadi et al,2010). Enfin, un bassin de stockage dans la galerie permet l'accumulation des matériaux en suspension, tandis que le creusement du lit de la galerie peut être effectué pour augmenter le débit de la foggara (Remini et al, 2014).

1.10. L'importance du système de la foggara :

Le système de la foggara, héritage ancestral des populations du Sahara, représente bien plus qu'un simple ouvrage hydraulique. Il constitue un élément clé de l'adaptation humaine à des environnements arides et semi-arides, et ce, depuis des millénaires. Son importance s'étend à plusieurs niveaux, du local au global.

1.10.1. Importance locale :

Sécurité alimentaire : La foggara a longtemps assuré l'approvisionnement en eau des oasis, permettant ainsi le développement d'une agriculture diversifiée et d'une production suffisante pour subvenir aux besoins des populations locales (Gast, 1998). **Maintien du tissu social :** Autour de la foggara s'est construite une organisation sociale complexe, basée sur la coopération et la gestion collective de l'eau (Remini, 2007). Ce système a favorisé la cohésion sociale et la transmission de savoirs traditionnels de génération en génération. **Adaptation au milieu naturel :** La foggara est un exemple remarquable d'ingénierie naturelle, parfaitement adaptée aux conditions climatiques et géologiques des régions désertiques. Elle permet une exploitation durable des ressources en eau souterraine, sans épuisement de la nappe.

1.10.2. Importance nationale :

Patrimoine culturel : Les foggaras constituent un patrimoine culturel immatériel d'une grande richesse, témoignant de l'ingéniosité et de la résilience des populations du Sahara. Leur préservation est essentielle pour la sauvegarde de l'identité culturelle de ces régions (Cheylan, 1990). **Développement durable :** Dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources en eau, les foggaras peuvent constituer une source d'inspiration pour développer des solutions durables de gestion de l'eau, adaptées aux spécificités des régions arides. **Tourisme durable :** Le système de la foggara présente un fort potentiel touristique, offrant la possibilité de valoriser le patrimoine naturel et culturel des régions où il est présent.

1.10.3. Importance globale :

Connaissances scientifiques : L'étude des foggaras a permis d'enrichir les connaissances en hydrologie, en géologie et en archéologie. Elles constituent un véritable laboratoire naturel pour étudier les interactions entre l'homme et son environnement.

Adaptation aux changements climatiques : Les principes de la foggara peuvent être appliqués dans d'autres régions du monde confrontées à des problèmes similaires de pénurie d'eau et de dégradation des terres. Elles offrent des solutions alternatives aux techniques d'irrigation traditionnelles, souvent énergivores et peu durables. **Développement de technologies innovantes :** Les recherches actuelles portent sur l'amélioration des systèmes de foggara, en

combinant les savoirs traditionnels avec les technologies modernes. L'objectif est de développer des systèmes plus efficaces et plus résistants aux changements climatiques.

1.10.4. L'importance écologique du système de la foggara :

Le système de la foggara, un réseau de galeries souterraines permettant de capter les eaux souterraines profondes, est une technique ancestrale développée dans les régions arides et semi-arides, notamment en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Bien qu'ancienne, cette technique présente des caractéristiques remarquables en termes de durabilité et d'adaptation aux contraintes environnementales. L'objectif de cette étude est d'analyser en détail les mécanismes par lesquels la foggara constitue un système hydraulique écologique, en s'appuyant sur les connaissances scientifiques actuelles.

Mécanismes écologiques de la foggara :

Minimisation de l'évaporation : En dirigeant l'eau souterraine vers la surface par des galeries souterraines, la foggara limite considérablement les pertes par évaporation, un phénomène particulièrement important dans les régions sèches. Cette caractéristique lui confère un rendement hydrique supérieur à d'autres systèmes d'irrigation traditionnels (Smith, 1992).

Maintien de la nappe phréatique : En exploitant les eaux profondes de manière raisonnée, la foggara contribue à maintenir le niveau de la nappe phréatique et à préserver les écosystèmes dépendants de cette ressource. Elle évite ainsi l'assèchement des puits et des sources (El Alaoui, 2005).

Adaptation aux conditions locales : La construction d'une foggara nécessite une connaissance approfondie du milieu naturel (géologie, hydrologie). Ce système est donc parfaitement adapté aux conditions locales, ce qui réduit les impacts environnementaux liés à des aménagements hydrauliques mal dimensionnés.

Absence d'énergie fossile : Le fonctionnement de la foggara ne requiert aucune source d'énergie externe, contrairement aux systèmes de pompage modernes qui consomment des combustibles fossiles et génèrent des émissions de gaz à effet de serre.

Intégration au paysage : Les foggaras sont souvent intégrées au paysage de manière harmonieuse, en suivant les contours naturels du terrain. Cette caractéristique réduit les impacts visuels et favorise la biodiversité (Benabdallah, 2010).

Intérêts actuels de la foggara : Face aux défis liés au changement climatique et à la raréfaction de l'eau, le système de la foggara suscite un regain d'intérêt. Il offre une alternative durable et respectueuse de l'environnement aux techniques d'irrigation modernes, souvent énergivores et à l'origine de nombreux problèmes environnementaux. Enfin, le système de la foggara est un exemple remarquable d'ingénierie hydraulique traditionnelle, parfaitement adaptée aux conditions environnementales des régions arides. Son fonctionnement repose sur des principes écologiques simples mais efficaces, qui en font un modèle de développement durable. La

réhabilitation et la valorisation de ces ouvrages anciens pourraient contribuer à améliorer la gestion de l'eau dans les régions touchées par la sécheresse et à préserver les écosystèmes fragiles.

1.11. L'impact de la dégradation des foggaras:

Les foggaras, systèmes d'irrigation souterrains millénaires, jouent un rôle crucial dans la préservation des écosystèmes oasiens, particulièrement dans les régions arides et semiarides. Leur dégradation, due à divers facteurs anthropiques et naturels, entraîne des conséquences multiples et profondes sur ces milieux fragiles.

1.11.1. Impact sur les ressources en eau:

Diminution des débits : La dégradation des foggaras se traduit par une réduction significative des débits d'eau disponibles pour l'irrigation et la consommation humaine (Zegait et Bensaha, 2019).

Salinisation des eaux : L'infiltration d'eau salée dans les galeries souterraines, liée à l'abaissement de la nappe phréatique, altère la qualité de l'eau et rend les sols impropres à la culture (Remini & Ghachi, 2019).

Épuisement des nappes phréatiques : La surexploitation des foggaras, associée à l'augmentation de la demande en eau, contribue à l'épuisement des ressources souterraines et à la dégradation de la qualité des eaux (Zegait et Bensaha, 2019).

Impact sur les écosystèmes

Désertification : La diminution des ressources en eau entraîne une dégradation des sols, une diminution de la couverture végétale et favorise l'avancée du désert (Zegait et Bensaha, 2019).

Perte de biodiversité : La dégradation des écosystèmes oasiens liée à la dégradation des foggaras entraîne une perte de biodiversité, tant au niveau de la flore que de la faune (Zegait et Bensaha, 2019).

Déséquilibre des écosystèmes : La modification des régimes hydrologiques induite par la dégradation des foggaras perturbe les équilibres écologiques et fragilise les oasis (Zegait et Bensaha, 2019).

Impact socio-économique

Insécurité alimentaire : La diminution de la production agricole due à la dégradation des foggaras menace la sécurité alimentaire des populations locales (Zegait et Bensaha, 2019).

Exode rural : La dégradation des conditions de vie liées à la dégradation des foggaras favorise l'exode rural et l'abandon des oasis (Zegait et Bensaha, 2019).

Perte du patrimoine culturel : Les foggaras constituent un patrimoine culturel immatériel et

matériel important. Leur dégradation entraîne une perte de ce patrimoine et une rupture avec les traditions locales (Remini et Ghachi, 2019).

1.12. Le khattara :

Le khattara, également connu sous les noms de foggara, qanat ou Falaj selon les régions, est un système d'adduction d'eau souterraine millénaire, particulièrement répandu dans les zones arides. Cette technique ancestrale témoigne de l'ingéniosité des populations ayant dû s'adapter à des environnements désertiques et semi-arides. Dans ce qui suit, nous allons explorer l'histoire, les principes de fonctionnement et les caractéristiques du khattara, en nous appuyant sur des références scientifiques.

1.12.1. Historique et répartition géographique :

Les origines exactes du khattara sont difficiles à déterminer avec précision, tant cette technique a été adoptée indépendamment par différentes cultures à travers le monde. On estime que les premiers systèmes de ce type ont été développés il y a plusieurs millénaires en Mésopotamie et en Iran (Badgley, 1967).

Répartition géographique : Le khattara s'est répandu dans de nombreuses régions arides, notamment : Afrique du Nord : Sahara, Maghreb (où il est appelé Foggara en Algérie et Khettara en Maroc) Moyen-Orient : Iran (qanat), Arabie Saoudite (Falaj)

Asie centrale : Afghanistan, Pakistan Espagne :

Andalousie (mudjiraat)

1.12.1. Principe de fonctionnement :

Le khattara est un tunnel légèrement incliné, creusé dans le sol pour capter une nappe phréatique à une altitude supérieure à celle du point d'utilisation. L'eau s'écoule ainsi par gravité à travers le tunnel, alimentant des puits verticaux régulièrement espacés. Ces puits servent à l'extraction de la terre lors de la construction et à l'aération du tunnel.

1.12.2. Structure et géométrie :

La structure d'un khattara est relativement simple mais nécessite une connaissance approfondie du sous-sol. Les principaux éléments sont :

La mère : C'est la partie du tunnel qui capte l'eau dans la nappe phréatique.

Le corps : La partie principale du tunnel, légèrement inclinée.

Les puits : Ils permettent d'extraire la terre lors de la construction et servent à l'aération et à l'entretien du khattara.

La géométrie du khattara est déterminée par la topographie du terrain, la profondeur de la nappe phréatique et la nature géologique des formations traversées. Le tracé du tunnel est généralement perpendiculaire aux isohyètes afin d'intercepter un maximum d'eau.

1.12.3. Importance et enjeux contemporains:

Les khattara ont joué un rôle essentiel dans le développement de nombreuses civilisations en leur fournissant une source d'eau fiable et durable. Cependant, avec le développement de l'agriculture intensive et l'urbanisation, de nombreux khattara ont été abandonnés ou endommagés. Aujourd'hui, l'intérêt pour ces systèmes ancestraux est relancé dans le contexte du changement climatique et de la recherche de solutions durables pour la gestion de l'eau.

Les khattara offrent en effet de nombreux avantages :

Durabilité : Ils exploitent une ressource renouvelable (la nappe phréatique) et ne nécessitent pas d'énergie externe.

Adaptation au milieu : Ils sont parfaitement adaptés aux conditions climatiques des régions Arides.

Biodiversité : Les khattara créent des microclimats favorables au développement de la végétation et à la biodiversité.

Le khattara est bien plus qu'un simple système d'irrigation. Il représente un patrimoine culturel et technique inestimable, témoignant de l'ingéniosité de l'homme face aux défis de l'environnement. Comprendre et valoriser ces systèmes ancestraux est essentiel pour relever les défis actuels liés à la gestion de l'eau dans les régions arides.

1.13. Les Aflaj :

Les Aflaj, véritables merveilles d'ingénierie hydraulique, sont des systèmes d'irrigation souterrains traditionnels d'Oman. Ces canaux complexes, creusés à même la roche, ont permis aux populations omanaises de cultiver des oasis luxuriantes dans un environnement désertique depuis des millénaires.

1.13.1. Historique :

L'origine exacte des Aflaj reste sujette à débat, mais les premières traces de ces systèmes remontent à plusieurs milliers d'années. Selon Al-Nabhani en 2004, les Aflaj auraient été développés par les premières communautés sédentarisées d'Oman, qui cherchaient à sécuriser une source d'eau stable pour l'agriculture et l'élevage.

1.13.2. Principe de fonctionnement :

Un Falaj se compose d'un tunnel principal, souvent très long, qui capte l'eau d'une nappe phréatique. Ce tunnel est légèrement incliné pour permettre à l'eau de s'écouler par gravité. Des puits verticaux, espacés régulièrement, sont creusés le long du tunnel afin de faciliter sa construction et son entretien. L'eau est ensuite distribuée à travers un réseau de canaux secondaires qui irrigue les palmeraies et les jardins.

Selon Al-Mashani en 2006, la conception des Aflaj est étroitement liée aux conditions géologiques et hydrologiques locales. Les Omanais ont développé une connaissance approfondie des nappes phréatiques et des roches, leur permettant de choisir les meilleurs emplacements pour creuser les tunnels.

1.13.3. Classification des Aflaj:

Les Aflaj peuvent être classés en trois catégories principales :

Aflaj d'eau douce : Ces Aflaj captent l'eau d'une nappe phréatique alimentée par les précipitations.

Aflaj de fonte : Ces Aflaj captent l'eau de fonte des neiges dans les montagnes.

Aflaj mixtes : Ces Aflaj combinent les caractéristiques des deux types précédents.

Importance culturelle et patrimoniale :

Les Aflaj ne sont pas seulement des systèmes d'irrigation, mais aussi un élément central de l'identité culturelle omanaise. Ils témoignent d'un savoir-faire ancestral transmis de génération en génération. En 2006, les Aflaj d'Oman ont été inscrits sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO, reconnaissant ainsi leur importance universelle exceptionnelle. Al-Busaidy en 2010 souligne que les Aflaj sont bien plus qu'une simple infrastructure hydraulique. Ils représentent un système de gestion de l'eau collective et durable, qui a façonné le paysage social et économique d'Oman pendant des siècles.

1.13.4. Enjeux de conservation :

Malgré leur importance, les Aflaj sont confrontés à de nombreux défis, notamment la concurrence des systèmes d'irrigation modernes, l'urbanisation et le changement climatique.

La préservation de ce patrimoine unique nécessite des efforts de conservation et de restauration importants.

1.14. Le Qanat :

Le qanat, également connu sous le nom de karez en Iran, est un système d'irrigation souterraine millénaire qui a permis à de nombreuses civilisations de prospérer dans des régions arides. Ce système ingénieux a été développé indépendamment dans plusieurs régions du monde, notamment en Iran, en Afghanistan et en Chine, témoignant ainsi d'une adaptation remarquable de l'homme à son environnement.

1.14.1. Histoire et origine :

Les origines exactes du qanat font l'objet de débats parmi les chercheurs. Cependant, les plus anciennes traces de ce système remontent à plusieurs millénaires avant notre ère. On estime que les qanats ont été développés pour la première fois en Iran, où ils sont toujours largement utilisés aujourd'hui.

Goudarzi en 2000 suggère que les qanats iraniens pourraient dater de la période achéménide (VIe-IVe siècles av. J.-C.). La diffusion des qanats s'est ensuite étendue à d'autres régions d'Asie centrale, du Moyen Orient et d'Afrique du Nord, transportée par les migrations et les échanges commerciaux.

1.14.2. Principe de fonctionnement :

Le qanat est essentiellement un tunnel légèrement incliné, creusé dans le sol pour capter une nappe phréatique. L'eau s'écoule par gravité à travers le tunnel jusqu'à la surface, où elle est utilisée pour l'irrigation des cultures ou l'approvisionnement en eau des villages. Le long du tunnel, des puits verticaux sont creusés à intervalles réguliers. Ces puits servent à plusieurs fonctions :

Extraction de la terre lors de la construction du qanat
Aération du tunnel.

Accès pour l'entretien et les réparations.

Structure et géométrie :

La structure d'un qanat est relativement simple, mais sa construction nécessite une connaissance approfondie de la géologie locale et des techniques de creusement. Les principaux éléments d'un qanat sont :

La mère : c'est la partie amont du tunnel, qui pénètre dans la nappe phréatique.

Le corps : c'est la partie principale du tunnel, qui transporte l'eau vers la surface.

Les puits : ce sont les puits verticaux qui permettent d'accéder au tunnel.

Le regard : c'est l'ouverture à la surface où l'eau sort du tunnel.

La géométrie d'un qanat est déterminée par plusieurs facteurs, notamment : La profondeur de la nappe phréatique. La pente du terrain. La nature du sol.

1.14.3. Importance et avantages

Les qanats ont joué un rôle essentiel dans le développement de nombreuses civilisations en leur permettant de s'établir dans des régions arides. Les principaux avantages des qanats sont :

Source d'eau constante et fiable: les qanats fournissent une source d'eau régulière, indépendamment des variations climatiques.

Faible coût de fonctionnement : une fois construit, un qanat nécessite peu d'entretien et ne consomme aucune énergie.

Impact environnemental réduit : les qanats ont un impact environnemental limité, car ils utilisent l'énergie naturelle de la gravité.

Adaptation aux conditions locales : les qanats peuvent être adaptés à une grande variété de conditions géologiques et climatiques.

Déclin et renaissance

Au cours des dernières décennies, de nombreux qanats ont été abandonnés en raison de la modernisation de l'agriculture et de l'accès à des sources d'eau alternatives. Cependant, avec la prise de conscience croissante des enjeux liés à la gestion de l'eau et au changement climatique, il y a un regain d'intérêt pour ces systèmes d'irrigation traditionnels. Towner en 1984 souligne l'importance de préserver les qanats en tant que patrimoine culturel et technique.

1.15. Comparaison de la foggara avec d'autres systèmes hydriques :

La foggara, ingénieux système d'adduction d'eau souterraine traditionnellement utilisé dans les régions arides d'Afrique du Nord, présente des similitudes remarquables avec d'autres techniques développées indépendamment dans diverses cultures à travers le monde. Cette étude comparative vise à explorer les parallèles et les divergences entre la foggara et ces systèmes analogues, en considérant leurs aspects historiques, techniques, géologiques et géométriques.

1.15.1. Historique et contexte culturel:

L'apparition de la foggara remonte à plusieurs millénaires et est étroitement liée aux besoins en eau des populations sédentarisées dans des environnements désertiques. Des systèmes similaires ont émergé dans d'autres régions arides, tels que les qanats en Iran, les Falaj en Oman et les foggaras en Espagne (Olmo, 2005). Ces techniques témoignent d'une adaptation remarquable de l'homme à son environnement et d'une ingéniosité sans égale pour exploiter les ressources en eau souterraine.

1.15.2. Principe de fonctionnement et structure :

Le principe de la foggara repose sur la capture d'une nappe phréatique à une altitude supérieure à celle du point d'utilisation. Un tunnel légèrement incliné est creusé à même la roche, permettant à l'eau de s'écouler par gravité jusqu'à la surface. La structure de la foggara comprend une série de puits verticaux, espacés régulièrement, qui servent à l'extraction de la terre lors de la construction et à l'aération du tunnel. Cette structure est similaire à celle des qanats iraniens et des Falaj omanais (Badgley, 1967).

1.15.3. Géométrie et géologie :

La géométrie d'une foggara est déterminée par la topographie du terrain, la profondeur de la nappe phréatique et la nature géologique des formations traversées. Les tunnels sont généralement orientés perpendiculairement aux isohyètes afin d'intercepter un maximum d'eau. Les qanats et les Falaj Présentent des géométries similaires, bien que les détails constructifs puissent varier en fonction des conditions locales. La géologie joue un rôle crucial dans la construction et le fonctionnement des foggaras. La présence de roches sédimentaires tendres, telles que les calcaires ou les marnes, facilite le

creusement des tunnels. En revanche, les roches dures, comme les granites ou les basaltes, rendent la construction plus difficile et moins rentable.

1.15.4. Comparaison avec d'autres systèmes :

En comparaison des caractéristiques de trois systèmes d'irrigation traditionnels : la Foggara/Khettara, le Qanat et le Falaj, respectivement originaires d'Afrique du Nord, d'Iran et d'Oman. Bien que ces systèmes aient émergé dans des contextes culturels distincts-berbère, perse et arabe - ils présentent des similitudes remarquables dans leur conception et leur fonctionnement. Tous quatre reposent sur le principe fondamental du captage d'une nappe phréatique, utilisant une structure composée d'un tunnel incliné et de puits verticaux. Cette convergence technique témoigne d'une adaptation ingénieuse aux contraintes des environnements arides, transcendant les frontières géographiques et culturelles. La répartition géographique de ces systèmes s'étend du Sahara et du Maghreb pour la Foggara et Khettara, à l'Iran et l'Afghanistan pour le Qanat, jusqu'à Oman et les Émirats Arabes Unis pour le Falaj. Les matériaux de construction, principalement la pierre et la brique, sont similaires, avec une légère variation pour le Falaj qui n'utilise que la pierre (Remini et al, 2012). La foggara, bien qu'elle soit étroitement associée à l'Afrique du Nord, s'inscrit dans un contexte plus large de développement de systèmes d'adduction d'eau souterraine dans les régions arides. Les similitudes entre la foggara, les qanats et les Falaj témoignent d'une convergence évolutive vers des solutions techniques optimales pour exploiter une ressource limitée. Ces systèmes traditionnels, souvent méconnus, offrent une source d'inspiration pour le développement de solutions durables à la gestion de l'eau dans les régions arides d'aujourd'hui (Remini et al, 2014).

1.16. Travaux antérieurs sur les Foggaras :

✓ Travaux de Goblot, 1979 :

Le livre remarquable de Goblot est la première source documentaire retraçant l'histoire et l'unicité des foggaras à travers le monde. Goblot a identifié le plateau iranien comme le berceau des qanats, une tradition vieille de plus de 30 siècles.

✓ Travaux de Kobori, 1982 :

Kobori, pionnier des qanats algériens, a consacré de nombreux travaux à la foggara d'Aoulef. Ses séjours répétés dans les oasis de cette région ont permis d'approfondir sa compréhension du rôle social essentiel joué par ces systèmes d'irrigation.

✓ Travaux Dubost et Moguedet en 1998 :

Pour la première fois, Dubost et Moguedet ont étudié les risques de disparition des foggaras

de Touât. L'introduction de nouvelles techniques de captage des eaux dans la région de Touât a eu lieu au début des années 80, avec la mise en place de rampes d'irrigation par aspersion pivotantes. Cette innovation a nécessité la réalisation de plus de 300 forages, qui soutirent entre 6 et 8 m³/s de la nappe du Continental Intercalaire. Cependant, cette nouvelle situation a entraîné des rabattements des niveaux piézométriques de la nappe. Aujourd'hui, nous constatons les conséquences de ces changements, notamment par l'assèchement d'une centaine de foggaras.

✓ **Travaux de Remini et Achour 2008 :**

Remini et Achour se sont penchés sur les causes de la dégradation de la foggara d'El Meghier, la plus grande foggara de Timimoun. Cette technique ancestrale d'irrigation, née dans le sudouest du Grand Erg occidental du Sahara, alimente encore aujourd'hui 907 oasis dans les régions de Touât, Gourara et Tidikelt. Cependant, ce patrimoine hydraulique et culturel précieux se dégrade inexorablement chaque année, victime de problèmes techniques et sociaux. La foggara d'El Meghier, l'une des plus vastes d'Algérie, est particulièrement touchée par ce phénomène. L'étude de Remini et Achour vise à identifier les causes précises de cette dégradation et à en comprendre les conséquences.

✓ **Travaux de Remini et Achour, 2010 :**

Dans leur étude, Remini et Achour ont examiné les similitudes entre les galeries drainantes présentes dans le monde. Ces galeries, connues sous différentes appellations telles que kariz, qanat et Khattara, sont utilisées depuis des siècles dans plusieurs pays arides et semi-arides pour le captage et la distribution de l'eau. Bien que ces techniques partagent une galerie horizontale, elles diffèrent en termes de source de captage et de partage des eaux entre les copropriétaires selon les pays. Au Sahara algérien, l'étude révèle l'existence de sept types de foggaras. Si les foggaras issues de sources, de montagnes et d'oueds ressemblent aux Aflaj du sultanat d'Oman, à la Khattara du Maroc et aux qanats iraniens, les foggaras de l'Albien, de jardin, de l'Erg et des crues sont spécifiques aux oasis du Sahara algérien. La foggara de l'Albien est la plus répandue localement, avec 890 foggaras fonctionnelles sur les 1400 inventoriées. En revanche, la foggara des crues est unique au monde, avec ses particularités de fonctionnement et de distribution de l'eau. La foggara de jardin illustre un modèle de gestion rationnelle de l'eau dans une région aride. Creusées en aval des grandes foggaras de l'Albien dans certaines oasis de Timimoun, ces six foggaras de jardin captent exclusivement les eaux d'infiltration et de drainage des jardins en amont. Quant à la foggara de l'Erg, elle demeure un secret bien gardé par quelques anciens oasiens de la région de Timimoun. Grâce à leur

ingéniosité, malgré des moyens rudimentaires, ils ont su capter les eaux souterraines cachées sous le Grand Erg Occidental, issues d'une nappe qui n'a pas encore révélé tous ses secrets.

✓ **Travaux de Remini et Kechad, 2012 :**

Selon Remini et Kechad, environ 4 200 foggaras sont actuellement en exploitation parmi les 11 500 creusées dans 16 pays arabes. Le Sultanat d'Oman se distingue en tête de liste pour l'utilisation de cette technique, avec 3 017 Aflaj qui irriguent les jardins de nombreuses oasis. L'Algérie, avec 903 foggaras fonctionnelles, occupe la deuxième place. Le Maroc se classe troisième, avec plus de 150 Khettaras encore en exploitation dans la région de Tafilalt. Environ 30 qanats Romani sont toujours fonctionnels dans les oasis de Syrie. Quelques dizaines de qanats coulent encore à travers le Yémen, l'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis, la Jordanie et la Tunisie. Malheureusement, certaines foggaras sont à l'arrêt ou abandonnées en Irak. Des vestiges et des traces de foggaras ont également été repérés dans les anciennes oasis de Libye et d'Égypte.

✓ **Travaux de Remini et Achour 2013 :**

Parmi les rares travaux consacrés aux foggaras dans les oasis de Tamanrasset, les études menées par Remini et Achour (2013) se distinguent. Contrairement aux foggaras des régions de Touât et de Gourara, celles de l'Ahaggar restent peu connues. Environ 184 foggaras ont été creusées dans cette région. Ces canaux souterrains, de longueur réduite, exploitent la nappe alluviale qui circule sous le lit des oueds. Leur débit varie au fil du temps, oscillant entre une valeur maximale et nulle. Pendant les crues, les agriculteurs apprécient le débit élevé des foggaras, mais ils redoutent les éboulements des galeries creusées dans les lits des oueds. Cette situation délicate, nécessitant l'entretien et la création de nouvelles foggaras à chaque crue, a conduit les agriculteurs à abandonner cette technique traditionnelle au profit des motopompes et des forages.

✓ **Travaux de Saberioon et Gholizadeh 2010 :**

La pénurie d'eau dans les régions arides et semi-arides a suscité un nouvel intérêt pour les techniques traditionnelles de gestion de l'eau. Parmi celles-ci, la récolte des eaux de pluie, les puits, les canaux souterrains (qanats) et les systèmes de collecte des eaux de surface. Les qanats, tunnels souterrains utilisés pour accéder aux eaux souterraines, sont une méthode durable d'extraction de l'eau qui remonte à plus de 5000 ans en Iran. Ces systèmes ont créé des écosystèmes adaptés aux besoins spécifiques de chaque communauté. Cette étude met en lumière leur histoire, leur structure, leurs avantages et leur rôle actuel en Iran.

✓ **Travaux de Remini et Achour, 2013 :**

Remini et Achour ont étudié une foggara originale, la triple foggara d'Ouled Said. Cette foggara est constituée d'un groupement de trois foggaras : Antrite, Amokrane, et Badgha. Contrairement aux foggaras de Timimoun et sparadrap, qui captent les eaux de la nappe du Continental Intercalaire, la triple foggara exploite les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental. Les mesures effectuées au niveau des trois Kasriat ont révélé un débit de 3,5 litres par seconde, partagé entre les 150 propriétaires de la foggara. Ce débit est nettement inférieur à celui des années 90, qui était de 26 litres par seconde. Les enquêtes et les entretiens menés auprès des propriétaires et de la population ont identifié les principales causes de la dégradation de ce système hydraulique : des facteurs socio-économiques tels que l'héritage et l'exode rural, ainsi que des facteurs environnementaux, notamment l'ensablement. Cependant, ce qui préoccupe grandement la population, c'est l'envahissement des galeries par une plante sauvage appelée localement « Tazra », dont les longues racines colmatent facilement la galerie de la foggara.

✓ **Travaux de Remini, Achour et Kechad, 2013 :**

Dans cette étude, les auteurs explorent les méthodes traditionnelles de partage des eaux à travers les foggaras dans les oasis de Gourara. La foggara, en tant que bien collectif appartenant à plusieurs propriétaires, est gérée par un système de répartition entre les abonnés. Chacun reçoit une part d'eau proportionnelle à sa contribution. Cependant, les enquêtes menées en 2007 et 2008 auprès de la population oasienne de Timimoun ont révélé que l'introduction de techniques modernes de captage d'eau, telles que les motopompes et les forages, a entraîné la disparition des méthodes ancestrales de partage des eaux. Certains métiers, comme celui de Kiel el Ma, ont également disparu. Actuellement, il ne reste qu'environ 15 Kiel el Ma dans toute la région de Timimoun.

✓ **Travaux de Remini, Kechad et Achour, 2013 :**

Les auteurs ont étudié le développement de la foggara dans les pays arides de la planète. Selon l'étude menée par Remini et Achour en 2013, 1. D'origine iranienne et vieille de plus de 3000 ans, elle allie les aspects sociaux et techniques et a été considérée comme le procédé le plus efficace de captage des eaux jusqu'à l'apparition des motopompes et des forages. Aujourd'hui, bien que les galeries drainantes concurrencent encore les techniques modernes de captage dans une dizaine de pays, elles sont totalement abandonnées dans plus de 40 pays. On estime qu'il existe actuellement environ 30 000 galeries opérationnelles dans le monde, un

nombre bien inférieur à l'estimation initiale qui reste difficile à évaluer. À titre indicatif, l'Iran à elle seule possédait entre 40 000 et 500 000 qanats.

✓ **Travaux de Remini, Achour et Kachad, 2014 :**

Pour la première fois, Remini et al. (2014) ont mis en évidence que le système des foggaras est un ouvrage en constante évolution. Leurs investigations dans les oasis de Touât et de Gourara ont révélé la complexité du réseau de distribution d'eau, où les seguias de différentes sections s'entrecroisent dans toutes les directions. Des connexions sont établies entre les foggaras via les seguias pour garantir l'approvisionnement en eau de chaque propriétaire. Neuf modèles de raccordement ont été identifiés, tant en amont qu'en aval de la kasria. Selon les auteurs, la foggara est un système hydraulique vivant : les oasiens creusent, entretiennent, prolongent, raccordent, distribuent et partagent l'eau. Pour répondre à la demande croissante en eau, les réseaux de captage (composés de galeries) et de distribution (composés de seguias et de Kasriat) se développent au fil du temps grâce à des extensions et des connexions.

✓ **Travaux de Remini et Rezoug, 2014 :**

Selon Remini et Rezoug (2014), depuis plus de sept siècles, les agriculteurs des oasis de Kendsa exploitent les eaux souterraines de Djebel El Barga à l'aide de drains souterrains. Environ quarante foggaras ont été creusées à la périphérie de la montagne El Barga. Actuellement, il ne reste qu'une dizaine de foggaras, avec un débit de quelques litres par minute. Contrairement à la foggara de Touât, qui s'étend sur une dizaine de kilomètres, la foggara de Kenadsa présente une galerie d'environ dix mètres. Le partage de l'eau de la foggara de Kenadsa s'effectue tour à tour, c'est-à-dire par unité de temps, ce qui entraîne une irrigation en série. L'introduction des motopompes dans l'oasis de Kenadsa a considérablement affecté la dégradation du système hydraulique traditionnel.

✓ **Travaux de Remini et Achour, 2014 :**

Pour la première fois, Remini et Achour ont étudié la "foggara de l'Erg". Selon les auteurs, cette foggara exploite les eaux de la nappe du Grand Erg Occidental (une ressource renouvelable). Environ 100 foggaras de l'Erg sont en service dans les oasis d'Ouled Said. Malgré leurs galeries perdues au milieu des immenses dunes de sable, ces foggaras continuent de fournir un débit d'eau appréciable pour les palmeraies et les jardins des oasis du nord de Timimoun. Cependant, leur emplacement à la périphérie du Grand Erg Occidental les expose fréquemment à l'ensablement. Dans l'oasis d'Aghlad, seule une foggara sur les 6 creusées initialement est encore en exploitation, tandis que les 5 autres ont été ensablées et abandonnées par leurs propriétaires. À Outakou, la population a réussi à sauver une foggara

en nettoyant les dépôts sableux dans la galerie et les seguias en 2002.

✓ **Travaux de Amri, Al Ghafri et Abd Rahman, 2014 :**

Oman, pays aride (100 mm de pluie par an), dépend quasi-exclusivement de l'irrigation pour son agriculture. Plus d'un tiers de l'eau d'irrigation provient des Falaj (sing. Falaj), un réseau de canaux souterrains acheminant 680 millions de m³ d'eau par an et irriguant 26 500 hectares. Cette étude analyse la gestion du Falaj Al Khatmain et propose des améliorations : utilisation de l'eau, vie communautaire, répartition entre exploitants et circulation de l'eau. Elle évalue également l'excédent d'eau pendant la période humide et la zone de recharge de la nappe phréatique. Elle conclut que le meilleur système de recharge, vu les conditions climatiques et hydrogéologiques, est un bassin d'infiltration pour stocker l'eau excédentaire du Falaj sans construction de barrage.

✓ **Travaux de Bensaada et Remini, 2015 :**

En 2015, Bensaada et Remini ont étudié l'impact de l'implantation d'un forage d'eau profond à proximité d'une foggara. Ce forage a entraîné l'abaissement du niveau piézométrique de la nappe d'eau souterraine, provoquant ainsi une diminution du débit de cette dernière et programmant sa dégradation progressive. Afin de préserver ce patrimoine universel, il est essentiel de gérer efficacement l'exploitation des différents forages pour éviter toute interférence avec les foggaras. Les auteurs recommandent également d'établir un rayon minimal lors de la réalisation de nouveaux forages.

✓ **Travaux de Remini et Achour, 2015 :**

Pour la première fois dans l'histoire des foggaras, les chercheurs ont identifié un nouveau type de foggara, appelé "foggara de jardin". Au cœur des jardins de Timimoun, cinq petites foggaras ont été découvertes, se distinguant des foggaras classiques par leur source de captage et leur mode de distribution. Comparée à la foggara traditionnelle, cette version de petite taille capte les eaux d'infiltration et les fuites provenant de la foggara classique située en amont. Localisée en aval de la grande foggara, cette variante semble inédite en Algérie. Invisible sur les images satellites, les photographies aériennes et les cartes topographiques, ces petites foggaras, creusées à l'intérieur des jardins et ne dépassant pas 1,5 km, abritent une vingtaine de puits d'aération. Leur emplacement au cœur des palmeraies et des jardins leur confère une originalité : elles permettent de drainer les fuites de la grande foggara, récupérant ainsi une précieuse ressource qui serait autrement perdue.

✓ **Travaux de Remini, Albergel et Achour, 2015 :**

La foggara d'Irsan, située dans l'oasis d'In Ghar, dans la région du Tidikelt, a été étudiée pour la première fois en termes de fonctionnement et d'état. Elle s'étend sur 8 km, avec 504 puits

d'air et 36 kasria (petits établissements). C'est la plus grande foggara de la région du Tidikelt, fournissant de l'eau à plus de 400 familles et irriguant environ 60 hectares de jardins. Cependant, des problèmes environnementaux et socio-économiques menacent sa pérennité à court terme.

✓ **Travaux de Tayara, 2015:**

L'étude s'interroge sur la modernisation de la gestion des Aflaj, s'appesantissant sur les avantages et les inconvénients des méthodes traditionnelles et modernes. La gestion traditionnelle, jugée inefficace face au développement socio-économique, peine à s'adapter. Ce développement a d'ailleurs un impact négatif sur cette gestion restée indépendante de l'État. Malgré son efficacité passée, la gestion traditionnelle ne peut intégrer les projets de développement des ressources en eau. Le concept d'administration locale diffère de celui de la gestion intégrée de l'eau. L'avenir de la gestion traditionnelle et le rôle de la gestion moderne des Aflaj sont donc en question. L'utilisation de méthodes modernes s'impose pour optimiser l'utilisation de l'eau. Ces méthodes passent par la constitution d'une base de données sur le rôle de l'eau dans la zone des Aflaj, la définition des limites administratives, l'importance du bassin et le développement de la base de données (densité du réseau pluvial). Il est crucial de choisir les méthodes adaptées pour optimiser la gestion des Aflaj et de doter les spécialistes, techniciens et observateurs des compétences scientifiques nécessaires. Sans cela, définir les priorités géographiques et envisager l'avenir des Aflaj au 21^{ème} siècle restera difficile.

✓ **Travaux de Boualem Remini, 2016:**

Dans ce travail, nous avons mis en évidence le rôle de la galerie pour améliorer le débit de la foggara. L'étude, basée sur des observations et l'utilisation des dernières données d'inventaire (recensement de 1998), a permis de diviser la galerie de la foggara en deux parties : le drainage et le transport. La partie "drainage", située à l'intérieur de l'aquifère, occupe les 2/3 de la galerie de la foggara. La partie "transport", d'une longueur égale à 1/3 de la galerie de la foggara, est essentielle pour le débit. Connaissant le principe de fonctionnement de la foggara, des méthodes anciennes d'amélioration du débit ont été proposées. Celles-ci comprenaient l'extension de la partie drainage de la galerie, le renforcement de la base de l'étanchéité de la partie transport de la galerie, la réalisation d'une petite foggara et le creusement de puits en aval de la foggara principale.

✓ **Travaux de Remini et Achour, 2017 :**

La foggara de Moghrar, vieille de plus de 7 siècles, assure l'irrigation de milliers de palmiers. Située dans l'oasis de Moghrar, elle puise son eau à partir d'une source. Équipée d'une galerie

de 300 mètres de long et d'un unique puits d'aération, elle irrigue la palmeraie. Malgré diminution du débit d'eau et l'ajout de pompes, la foggara continue de fonctionner.

✓ **Travaux de Ghachi et Remini, 2018 :**

La foggara d'Irsan, située dans l'oasis d'In Ghar, dans la région du Tidikelt, a été étudiée pour la première fois en termes de fonctionnement et d'état. La foggara s'étend sur une longueur de 8 km, avec 504 puits d'air et 36 kasria (petits établissements). Elle est considérée comme la plus grande foggara de la région du Tidikelt. Plus de 400 familles dépendent de l'eau de ce système ancien, qui irrigue environ 60 hectares de jardins. Cependant, en raison des défis environnementaux tels que l'envahissement de sable et les éboulements dans les galeries, ainsi que des facteurs socio- économiques liés aux nouvelles techniques, la foggara d'Irsan se dégrade d'année en année et risque de disparaître à court terme.

✓ **Travaux de Abdullah Al-Ghafri, 2018 :**

Les Aflaj d'Oman, vieux de plus de sept siècles, sont essentiels pour l'irrigation des palmiers. Ces systèmes ancestraux, présents dans environ 50 pays, ont permis de survivre dans un environnement aride. Au fil des siècles, ils ont façonné la civilisation omanaise et assuré stabilité sociale et politique. Malgré leur diminution, ces systèmes continuent de fonctionner durablement grâce à des concepts traditionnels tels que le recyclage de l'eau et la permaculture. L'UNESCO a d'ailleurs inscrit cinq Aflaj omanais au patrimoine mondial. Cependant, ces systèmes font face à des défis pour leur survie future.

✓ **Travaux de Al-Marshoudi, 2018 :**

Situé dans le sud-est de la péninsule arabique au climat semi-aride (100 mm de pluie annuelle), Oman dépend entièrement de l'irrigation pour son agriculture. Plus d'un tiers provient des Aflaj (sing. Falaj), anciens systèmes d'irrigation fournissant 680 millions de m³ d'eau par an et irriguant 26 500 hectares. "Aflaj" signifie "diviser l'eau" en arabe classique, mais désigne aussi les canaux et tunnels souterrains acheminant l'eau vers les villages. Cette étude examine les mécanismes de gestion du Falaj Al Khatamain, à Birkat Al Mawz, Sultanat d'Oman. En analysant des données de précipitations et de débit du Falaj, l'étude révèle un lien fort entre la variabilité physique de l'eau et les règles de gestion traditionnelles.

✓ **Travaux de Remini, 2019 :**

Ce travail évoque pour la première fois l'un des secrets de la foggara : la quantification des parts d'eau des détenteurs de droits. En effet, lors des missions de travail menées dans les oasis du Sahara algérien de l'année 2000 à l'année 2019, l'attention s'est portée sur l'art de mesurer le débit d'eau d'une foggara à l'aide de méthodes ancestrales. D'un point de vue

hydraulique et social, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont impressionnants. L'outil de mesure utilisé dans les oasis de foggara repose sur le principe du débit à l'orifice. Deux débitmètres ont été inventés et utilisés dans différentes régions du Sahara. Deux modes de distribution de l'eau de la foggara ont été mis en évidence: le mode volumétrique et le mode horaire, chacun avec ses propres outils de mesure. Pour la distribution volumétrique, l'irrigation est réalisée en parallèle. En revanche, pour la distribution horaire, l'irrigation se fait en série.

✓ **Travaux de Remini, 2019 :**

Ce travail examine les problèmes ayant contribué à la dégradation de deux techniques d'irrigation millénaires : la foggara et le Ghout. L'étude a été menée entre 1990 et 2019 dans les oasis de Touât, Gourara, Tidikelt et Souf. Des enquêtes ont été réalisées auprès de la population ksourienne, des propriétaires de foggaras et des Ghouts. Les résultats obtenus montrent que les forages profonds réalisés dans ces régions sont la principale cause du déclin de ce patrimoine hydraulique. Alors que la foggara est abandonnée suite au rabattement de la nappe, pour le Ghout, c'est la remontée de la nappe qui a engendré son déclin.

✓ **Travaux de M.Mokdad, Mebarki, I.Mokdad et Bouabdallah, 2020:**

La Foggara, en tant que méthode traditionnelle d'irrigation, est toujours utilisée en Algérie, notamment dans les déserts occidentaux (régions du Touât, du Gourara et du Tidikelt). Le travail humain au sein du système de Foggara peut être un travail de creusement, de maintenance ou de distribution. Dans cette recherche, nous nous sommes penchés sur la maintenance de la Foggara, dans le but d'éclairer les tâches effectuées par les ouvriers lors de l'entretien, l'effort qu'ils déploient pour maintenir le système et les zones du corps les plus exposées à la fatigue. Pour mener à bien cette étude, des données ont été collectées auprès de 37 ouvriers chargés de la maintenance des Foggara, en utilisant des entretiens, l'échelle de Borg et l'échelle nordique. Il a été constaté que la principale tâche de maintenance de la Foggara était le nettoyage et la réparation, que l'effort requis pour maintenir la Foggara était élevé et que les ouvriers étaient exposés à un niveau élevé d'inconfort physique lors de leur travail de maintenance.

✓ **Travaux de Ghachi, Remini et Hamoudi, 2021 :**

Dans ce travail pour la première fois, les conséquences des modifications apportées au système de la Foggara sur l'environnement. Au cours de nos missions de travail et de recherche menées dans les oasis de Touât, Gourara et Tidikelt au cours des 20 dernières années (période 2000- 2020), nous avons observé de nouvelles pratiques mises en œuvre par

les propriétaires terriens sur la Foggara, à savoir des modifications introduites dans différentes parties de la Foggara dans le but d'améliorer le débit de la Foggara. Deux matériaux, le PVC et le ciment, ont été introduits dans les oasis de Touât, Gourara et Tidikelt. Les Souagui en terre ont été remplacés par des tuyaux en PVC et PEHD, et les Madjens en terre ont été transformés en Madjens en ciment. Ces modifications se sont avérées dramatiques pour l'esthétique et l'hydraulique de la Foggara. De telles interférences risquent de faire disparaître ce patrimoine ancestral et auront des répercussions négatives sur le tourisme dans la région.

✓ **Travaux de Remini et Ghachi, 2021 :**

Héritière de plus de 20 siècles d'histoire, la Foggara, système d'irrigation ancestral, a façonné le destin des oasis du Sahara algérien. Fruit de deux décennies de recherches, cette étude dévoile les secrets techniques et sociaux de ce patrimoine unique. Adaptée aux environnements arides, la Foggara ingénieusement capte les eaux souterraines et les achemine vers les oasis, transformant des déserts en terres fertiles. Au-delà de sa dimension technique, elle revêt une dimension sociale essentielle, garantissant un accès équitable à l'eau pour la communauté oasienne. Malgré les efforts de réhabilitation, la Foggara est menacée par des défis croissants. Raréfaction de l'eau, pression urbaine et changement climatique mettent en péril ce système millénaire.

✓ **Travaux de Mebarki, M.Mokdad, Semmani et I.Mokdad, 2021:**

Le système d'irrigation traditionnel Foggara est encore largement utilisé dans les déserts occidentaux de l'Algérie. Pour que les Foggaras survivent, ils doivent être entretenus. La maintenance des Foggara nécessite un travail humain considérable tout au long de l'année, en particulier pendant les mois chauds où l'eau devient vitale pour les humains, les animaux et l'ensemble de la palmeraie. Les travaux de maintenance des Foggara sont généralement effectués sous terre, dans les puits, les tunnels et les galeries (zones confinées). Cette recherche vise à développer un outil d'évaluation ergonomique des postures de travail dans ces espaces souterrains restreints. L'échantillon de recherche était composé de 13 hommes travaillant depuis de nombreuses années à la maintenance des Foggara. Le développement de l'outil a suivi différentes étapes. Les chercheurs ont réussi à créer l'outil (UPAT) adapté à la situation étudiée. L'UPAT s'est avéré valide et fiable, non seulement pour cette recherche, mais également pour d'autres chercheurs travaillant dans des situations similaires. L'utilisation de l'outil sur le terrain a montré que les ouvriers de la maintenance des Foggara, qu'ils travaillent dans les puits ou les tunnels, adoptent différentes postures de travail (debout,

accroupi, en position accroupie, à genoux et en rampant) pendant des périodes différentes. L'image complète de ce qui se passe dans la maintenance des Foggara peut être extrapolée à partir de ces résultats partiels. Il est donc compréhensible que ce type de travail soit dangereux, fatigant et épuisant, car il implique un stress physique, mental et psychologique considérable.

✓ **Travaux de Zaina, Branduini et Zavvari, 2022 :**

Les systèmes hydrauliques historiques représentent une part significative des paysages et du patrimoine mondial. Cependant, depuis la seconde moitié du XXe siècle, d'importants changements socio-économiques et technologiques à l'échelle mondiale les ont exposés au risque d'abandon et, éventuellement, de disparition. Les qanats, anciens tunnels souterrains utilisés pour accéder aux eaux souterraines, ont longtemps été une solution durable pour l'irrigation. Malheureusement, ces systèmes ont été progressivement remplacés par des technologies modernes polluantes et non durables. Cette étude propose une approche de restauration ou de réutilisation des qanats, en tant qu'éléments essentiels du patrimoine culturel et naturel local et régional, ainsi que comme ressource économique précieuse et système respectueux de l'environnement. Notre étude de cas porte sur le qanat No-Ras dans le nord-ouest de l'Iran.

✓ **Travaux de Remini, 2022 :**

Cet article présente une classification inédite des foggaras et une carte de leur répartition géographique. Plus de 20 siècles d'histoire ont façonné ce patrimoine unique, aujourd'hui menacé de disparition. Neuf types de foggaras ont été identifiés, exploitant différentes ressources en eau. Deux modes de partage de l'eau ont été mis en évidence, le mode volumétrique étant plus efficace. La richesse et l'originalité de ce système hydraulique contrastent avec sa fragilité actuelle. Seules 15% des foggaras recensées sont encore en service. Des mesures urgentes sont nécessaires pour sauvegarder ce patrimoine culturel exceptionnel.

✓ **Travaux de Remini, 2023 :**

Cette étude met en lumière le rôle crucial de la foggara dans la sécurité hydrique des oasis du Sahara algérien. Entre 1998 et 2022, des enquêtes et des entretiens auprès des habitants des oasis, des propriétaires de foggaras et des anciens ont permis de retracer l'histoire et le fonctionnement de ce système hydraulique millénaire. L'oasis est l'une des premières régions au monde à avoir assuré sa sécurité hydrique grâce à la foggara. Cette structure durable,

composée de deux parties (collecte-transport et distribution de l'eau), s'adapte aux déficits en eau. La partie amont, constituée d'un réseau de galeries ramifiées, évolue en fonction des besoins. La partie aval, un réseau triangulaire de seguias, divise l'eau en microquantités. L'eau de la foggara, de très bonne qualité, circule sur plusieurs kilomètres sans stockage ni stagnation.

Conclusion :

En conclusion, la foggara, système hydraulique ingénieux ancré dans l'histoire des oasis sahariennes, se révèle être une véritable symbiose entre l'innovation technique et l'organisation sociale. Sa définition précise, sa description détaillée, son riche héritage historique et les résultats de notre exploration bibliographique convergent vers une réalité indéniable : la foggara, malgré les efforts de restauration entrepris, se trouve aujourd'hui à un tournant crucial de son existence.

Face aux défis socio-économiques et environnementaux croissants, la survie de ce patrimoine ancestral repose sur notre engagement collectif à sa préservation. La foggara, garante de vie et de durabilité au coeur des écosystèmes arides, mérite une attention particulière et des actions concrètes pour assurer sa pérennité. En conjuguant nos efforts, nous pouvons perpétuer ce savoir-faire millénaire et garantir aux générations futures un héritage précieux, symbole de résilience et d'adaptation face aux aléas du climat.

Chapitre 2:

LA RÉGION D'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Introduction :

L'objectif central de ce chapitre est de présenter l'environnement dans lequel s'inscrit notre recherche. Pour ce faire, nous nous appuyons à la fois sur les données géologiques et les aspects liés à l'hydre-climatologie. Cette approche nous permettra de mieux appréhender l'extraordinaire richesse qui caractérise la commune d'Adrar, située dans la Wilaya d'Adrar.

2.1. Présentation de la Wilaya d'Adrar :

La Wilaya d'Adrar a vu le jour suite au découpage administratif résultant de la loi n°19- 12 du 11décembre 2019 relative à l'organisation territoriale du pays (**fig.2.1**). Elle occupe une superficie totale de 427 968 km², ce qui représente 17,98 % du territoire national. La population estimée de la Wilaya d'Adrar s'élève à 352 195 habitants, selon les données du RGPH 2021. La densité de population est de 1,30 habitant par kilomètre carré. Ce chapitre constituera un socle solide pour notre étude, nous permettant d'explorer plus en profondeur les interactions entre l'environnement géologique, le climat et les ressources hydriques dans cette région.

Elle est limitée par :

Au Nord : La Wilaya de Timimoune.

Au Nord-ouest : La Wilaya de Beni Abbas. A l'Ouest : La Wilaya de Tindouf.

Au Sud-ouest : La République de Mauritanie. Au Sud : La Wilaya de Bordj Badji Mokhtar.

Au Sud-est : La Wilaya de Tamanrasset.

A l'Est : la Wilaya de Ain Saleh.

✓ Les coordonnées géographiques: 27° 52' Nord et 0° 17' Ouest



Figure 2.1: Carte de localisation de la wilaya.

2.2. L'origine du mot Adrar :

Le terme "Adrar" tire ses origines de l'époque où la région de Touât était peuplée par les Zénètes. Cette désignation est utilisée à la fois dans le Sahara occidental et oriental, englobant des endroits tels que Adrar Mauritanie et Adrar Chinguetti en Mauritanie, le mont Adrar dans le Tassili, Adrarn-Ebbou à Tamanrasset, et Adrar-n-Iforas au Mali. Selon Charles Foucauld en 1940, dans son Dictionnaire Touareg-Français, définit le mot Adrar (pl. Idraren) comme indiquant « montagne, chaîne de montagnes ». On retrouve cette même signification également dans le nord de l'Algérie, en Kabylie, comme dans Adrar Bgayet « la montagne de Béjaïa ». En berbère, Adrar signifie aussi « plateau ». En raison de l'absence de montagnes dans la région, Adrar dans le Touât actuel ou passé ne peut pas être qualifié de « montagne » sur le plan géographique. Il est indéniable qu'elle signifie « plateau », car de nombreux « Hamadas » (plateaux en arabe) existent dans la région, tels que Hamada Tadmait et Hamada Tidikelt.

Dans la région du Touât, Adrar est traditionnellement défini comme l'abréviation du nom pluriel berbère Adghaghen (sing). Dans la ville actuelle d'Adrar, les autochtones qualifient le quartier appelé Adgha de « galets, roches », car il est considéré comme la plus ancienne construction de la région.

L'histoire locale raconte que le village d'Oudgha a été détruit deux fois par les crues de l'Oued Messaoud, un affluent de l'Oued Essaoura situé plus au nord. Selon la tradition, seuls

des pierres et des rochers ont subsisté après ces inondations. Le nom “Adrar” (variantes : Adghar, Oudghar) pourrait venir de ces catastrophes naturelles qui ont marqué un lieu peuplé. Le terme “Adrar” signifie “montagne”, qui empêche normalement les rivières de déborder, contrairement à un “plateau” qui, lui, peut favoriser de telles inondations. Adghaghen est devenue la capitale de la région du Touât au 18ème siècle et a conservé ce nom depuis. Les résidents sparadrap considèrent que “Adghar” (ou “Oudghar”) est à l’origine de leur nom. En 1900, quand l’armée française est arrivée dans le Touât, elle n’a pas changé le nom “Adghar” mais a simplement modifié son orthographe pour devenir “Adrar” comme on le connaît aujourd’hui.

2.3. Présentation de la la zone d’études :

Tamentit est une commune algérienne située dans la wilaya sparadrap, au cœur de la région du Touât. Voici quelques éléments clés concernant cette localité :

Géographie :

Le territoire de la commune de Tamantit s’étend au centre de la wilaya sparadrap. Son chef-lieu se trouve à environ 13 km au sud sparadrap, accessible par la route. La superficie de la commune est de 6937 m² selon l’Agence Nationale d’Intermédiation et de Régulation Foncière en 2021, 1. La route reliant notre zone d’étude à son chef-lieu, Adrar, s’étend sur environ 24 km. Tamentit est entourée par plusieurs autres communes, dont Sebaa Aougrou, Tamekten, Ouled Ahmed Timmi, Fenoughil et Adrar. Ces coordonne géographiques sont :

X: -0.218681

Y: 27.770654 Z : 239m

Origine du Nom :

Le toponyme “Tamantit” (prononcé “tmantète”) est issu du berbère. Il se compose de deux parties : “Aman”, qui signifie “eau”. “Tit”, signifiant “source” en berbère. Ainsi, le nom complet de la localité se traduit par "source d’eau".

2.4. Caractéristiques naturelles et conditions climatiques :

La wilaya d’Adrar est réputée pour être le territoire des foggaras. Ce système ingénieux a joué un rôle crucial dans la genèse des centres de vie historiques et économiques de la région, en donnant vie aux palmeraies et à la multitude de Ksour, ce qui a conduit à la structuration actuelle du système territorial. L’aménagement de l’espace de la wilaya dépend fortement des Ksour, des palmeraies, des foggaras et du patrimoine traditionnel et culturel, selon une approche systémique. Adrar, se situe à 1300 km au sud ouest d’Alger, est considérée comme la capitale des foggaras . Répartis sur la périphérie du côté ouest du plateau de Tademaït, les foggaras sparadrap captent les eaux de la nappe du Continental Intercalaire.

2.4.1 Hydrogéologie de la zone :

L'hydrogéologie du Sahara comprend quatre complexes hydrogéologiques profonds présentant des eaux salées situées dans les formations géologiques suivantes : le Cambro-Ordovicien, le Silurien supérieur - Dévonien inférieur, le Dévonien supérieur - Carbonifère et le Trias. Ensuite, une série supérieure du Continental Intercalaire renferme des eaux souterraines de qualité utilisable (Castagny, 1982). Notre zone fait partie de la nappe du Continental Intercalaire ou la formation hydrogéologique la plus étendue dans le Sahara algérien est constituée de matériaux meubles sablon gréseux d'âge crétacé inférieur. Cette formation peut également inclure des séries plus anciennes du Jurassique et du Trias. Les caractéristiques morphologiques et structurales de cette région permettent de distinguer trois sous-bassins hydrogéologiques. Ces sous-bassins sont délimités par une dorsale subméridienne, à savoir Ghardaïa, Elgolea, In Salah, ainsi que la région côtière du golfe de Gabès.

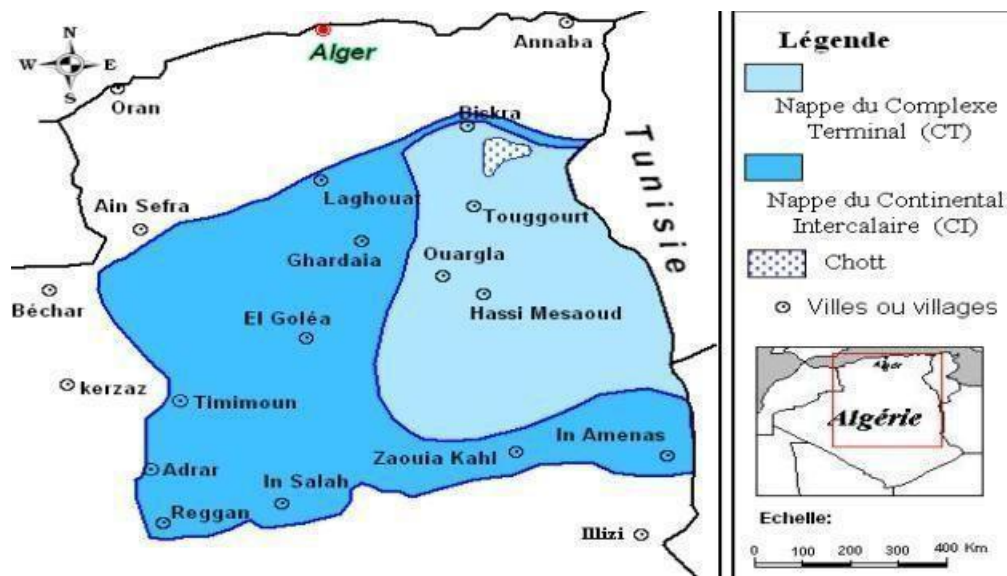


Figure 2.3: Carte des ressources en eau souterraine dans le Sahara (Continental intercalaire) (UNESCO, 1982).

2.4. 1. Relief :

La wilaya d'Adrar se distingue par un relief désertique qui se divise en grands ensembles géomorphologiques, qui sont :

2.4.1.1. Plateaux :

Ils englobent de vastes zones, y compris le plateau le plus vaste est celui du Tanezrouft, ils sont constitués de diverses formations géologiques (fig.2.4) :

Crétacé inférieur du continentale intercalaire.

Crétacé supérieur secondaire marin.

Mio-Pliocène.

a. El Erg :

Il s'agit de massifs dunaires s'étendant sur près de la moitié de la superficie de la wilaya, ils se sont formés au cours du quaternaire (Grand Erg Occidental et l'Erg Chèche).

b. Sebkhass :

Elles se trouvent aux endroits les plus bas et sont habituellement liées aux anciens lits d'oueds. Les sebkhass de Timokten et de Bouda ont une influence majeure sur la wilaya.

c. Le Reg :

C'est des grandes superficies plates composées de rocaille et gravier en général. Il est d'âge quaternaire, on peut trouver des sables d'âge Crétacé inférieur. Exemple le Reg de Tanezrouft. (Ghaoui et Hadj Ali, 2017).

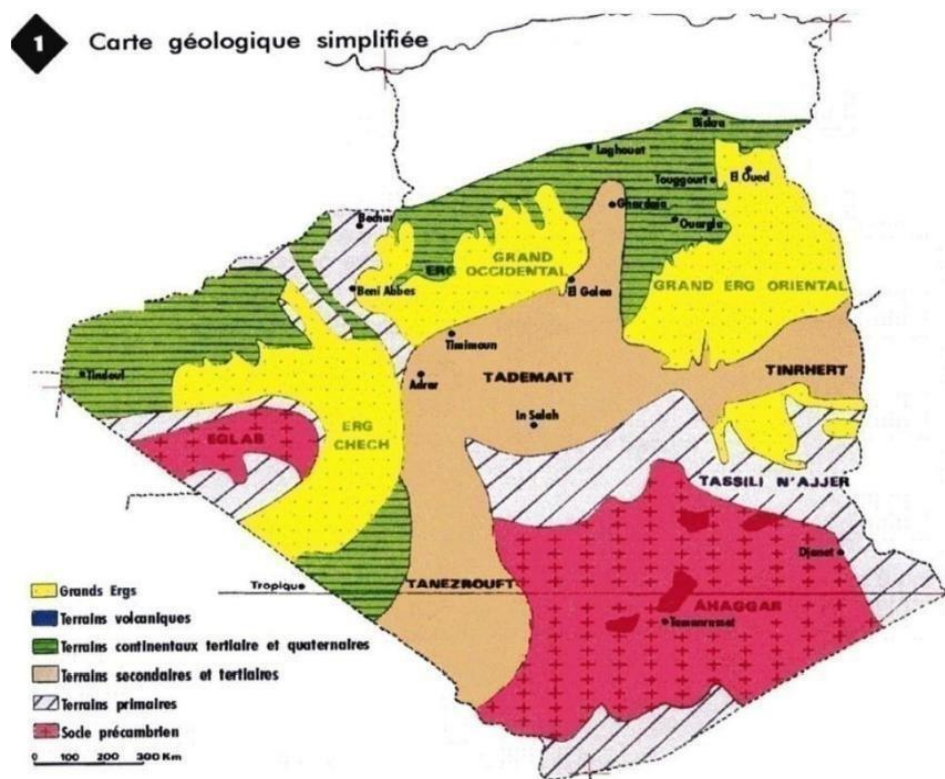


Figure 2.4 : Carte géologique simplifiée (ANIREF, 2021).

2.4.2 Les conditions climatiques :

La wilaya d'Adrar a un climat désertique continental, caractérisé par une sécheresse prononcée et une forte insolation quotidienne (7 à 8 heures en hiver et 10 à 11 heures en été). La wilaya est constituée d'une zone climatique désertique qui s'étend de Tassabit à Reggane. En ce qui concerne le climat de cette région, il s'agit d'un climat désertique caractérisé par des températures élevées en été et basses en hiver. Cette variation de température entraîne l'expansion de la marée thermique, en plus du manque de précipitations qui contribue à ce phénomène. Les précipitations sont rares et se manifestent sous forme de pluies soudaines et

peu efficaces en raison de l'évaporation rapide de l'eau. Malheureusement, ce climat désertique cause souvent d'importants dégâts aux habitations construites en briques locales, ce qui conduit à leur démolition. Il est important de noter que la quantité annuelle de précipitations ne dépasse pas 550 mm au maximum. La caractérisation climatique du projet a été effectuée à partir de 21 ans de données (1990- 2011) de la station météorologique de l'Aéroport d'Adrar (tableau.1) pour assurer une précision optimale.

Tableau 2.1 : Données de la station météorologique de l'Aéroport d'Adrar.

Nom de la Station	Code	Coordonnées		Altitude (m)	Période d'observation	Nombre d'année d'observation
		X (Km)	Y (Km)			
Aéroport d'Adrar	606200	776,60	3082,66	276	1990–2011	21

2.4.2.1. La température:

La wilaya d'Adrar connaît des variations de température significatives (tableau 2). Durant la saison estivale (juin, juillet et août), les températures atteignent des niveaux extrêmes, pouvant atteindre jusqu'à 45 °C. Cependant, pendant la période hivernale (décembre et janvier), les températures peuvent parfois chuter jusqu'à 0 °C. La région d'Adrar se distingue par des températures moyennes très élevées. La température est un facteur qui impacte la disponibilité de l'énergie et c'est grâce au degré jour que la végétation manifeste son régime biologique. En observant le tableau, nous pouvons constater que la température maximale est enregistrée au mois de juillet, dépassant les 46°C. Le mois de janvier est le plus froid, avec une température minimale atteignant les 5°C. La période la plus chaude de l'année s'étend sur quatre mois (juin, juillet, août et septembre) et exerce une grande influence sur la végétation de la région.

Tableau 2.2 : Températures mensuelles maximale, moyenne et minimale.(Source: ONM)

mois	jan	fev	mar	avr	mai	jun	jul	aou	sep	oct	nov	dec	moy
Tmin (C°)	5.1	7.7	12.0	16.3	20.8	25.6	28.5	28.0	24.9	18.6	11.0	6.4	17.0
Tmax (C°)	21.1	24.2	28.9	33.2	37.9	43.1	45.8	44.9	41.0	34.3	27.2	22.0	33.6
Tmoy (C°)	12.9	16.1	20.8	25.3	30.0	35.1	38.0	37.1	33.2	27.1	19.2	13.9	25.7

2.4.2.2 Le vent :

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques de la région d'Adrar, on note que les vents sont très fréquents durant toute l'année (tableau 3), c'est durant la saison du printemps (Mars- Avril) que se manifestent violemment les tempêtes de sable, des vitesses supérieures à 20 m/s (72km/h) sont observées dans la région, en été, les vents sont chauds et secs (sirocco) avec une direction dominante des vents Nord-Est en hiver et SW en été (Ben Hamza, 2013).

Tableau 2.3 : Données mensuelle sur la vitesse des vents d'Adrar. (Source: ONM)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Année
Vent moy (m/s)	1.7	2.2	2.0	1.8	2.4	2.0	2.0	1.7	1.8	1.6	1.5	1.8	1.9

En examinant le tableau ci-dessus, il est évident que la vitesse du vent atteint un minimum de 1,5 m/s au cours de l'année, ce qui qualifie la région de venteuse.

2.4.2.3 La pluviométrie:

Les régions sahariennes sont connues pour leur faible taux de précipitations. Selon tableau 4 ci-dessous, les précipitations annuelles sont extrêmement réduites et ne dépassent guère les 50 mm par an dans toute la zone s'étendant d'El Goléa à In Salah. Dans notre région d'étude, les précipitations s'élèvent à environ 2-30 mm par an.

Tableau 2.4 : données de précipitations moyennes mensuelles en mm. (Source:ONM)

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Année
P_{moy} (mm)	2.5	2.6	1.7	0.7	2.7	2.5	1.5	6.0	1.2	0.3	0.1	1.2	23.0
P_{moy} Saison	6.8			5.9			8.7			1.6			23.0
%	29.6			25.7			37.8			6.9			100

Selon le tableau on trouve que la région a un climat hyper-aride avec seulement 23 mm de précipitations annuelles. Les caractéristiques pluviométriques sont faibles, irrégulières et limitées dans le temps, rendant une irrigation substantielle essentielle pour les cultures. À Adrar, le déficit hydrique annuel est de 2728 mm, sans mois avec un bilan hydrique positif. Ces moyennes soulignent les défis pour la végétation et la nécessité d'adaptation des cultures à cet environnement difficile.

2.4.2.4 Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évaporation est le passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux. L'évapotranspiration potentielle (ETP) désigne l'évapotranspiration d'un couvert végétal dense et bien irrigué, influencée par divers facteurs climatiques. Dans la région de Touât, l'ETP atteint des niveaux

maximaux, avec un rapport précipitations/ETP (P/ETP) déficitaire. En l'absence de mesures directes, l'ETP est estimé par calcul, notamment avec la formule de Penman-Monteith dans le tableau 5, qui prend en compte plusieurs facteurs climatiques.

Tableau 2.5 : Valeurs calculés de l'évapotranspiration. (Source : ONM)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Année
ETP MensM m/moi	111	147	221	263	305	314	345	321	266	213	138	107	2751

2.4.2.5 Insolation:

La durée de l'insolation représente essentiellement la longueur du jour. Ce paramètre varie d'un endroit à l'autre en fonction de l'exposition au soleil, de la couverture nuageuse et de la latitude dans le tableau 6. Elle a un impact direct sur la température et, par conséquent, sur les autres éléments du climat.

Tableau 2.6 : Durée moyenne d'exposition au soleil. (Source:ONM)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC	Année
L'insolation (h/jour)	8.9	8.9	9.1	9.9	10.4	10.7	10.6	9.8	8.6	8.8	8.7	8.2	9.4

L'insolation varie de manière régulière au cours de l'année, atteignant des pics en été, notamment en juin, où elle atteint en moyenne 10,7 heures par jour. En général, la durée d'insolation à Adrar est importante, avec un minimum de 8 heures par jour tout au long de l'année.

2.4.2.6 La faune et le flore :

La végétation se concentre principalement dans les zones irriguées. Ces zones sont principalement composées de palmiers, sous lesquels se développe une agriculture oasienne vivrière. De plus, le développement de l'irrigation par pivots a permis d'étendre la superficie agricole de la région. La nature de la végétation est typiquement saharienne. En plus de la végétation présente dans les vergers, les ksour et les oasis, une flore abondante prospère à Bordj Badji Mokhtar et Timiaouine, où l'on trouve des espèces telles que l'acacia et l'Aristide. Les mammifères présents comprennent notamment le mouflon à manchettes, qui se trouve dans les régions les plus escarpées, ainsi que les gazelles, qui sont nombreuses dans les grands ergs. Les reptiles sont également représentés, notamment par le fouette-queue, le varan, les agames et les vipères.

2.4.2.7 Indices climatiques :

Ce sont des critères qui s'appuient sur les valeurs de la température et des précipitations d'une région, à l'aide de formules pour analyser l'influence de ces éléments climatiques sur la végétation. On utilise principalement deux indices célèbres : celui de MARTONE e 1926 et celui d'EMBERGER.

a. L'indice d'aridité de MARTONE :

Cet indice montre le niveau de sécheresse d'une région et informe sur le manque d'irrigation.

$$I = P / (T + 10) \dots \dots \dots (2.1)$$

Où : P: précipitations moyennes annuelles (mm). T: températures moyennes annuelles (°C).

Pour :

20 < IA < 30 climat tempéré

10 < IA < 20 climat semi-aride

7.5 < IA < 10 climat steppique

5 < IA < 7.5 climat désertique

IA < 5 climat hyperaride

On a:

$$P = 23 \text{ et } T = 25.7 \text{ °C}$$

$$A. N : IA = 0.64$$

L'indice d'aridité indique un climat désertique avec des températures élevées et des précipitations faibles. Les étés sont longs et chauds, les hivers doux avec des pluies sporadiques, limitant la végétation. La faune et la flore s'adaptent, mais les sols arides compliquent l'agriculture et la vie communautaire. Les habitants doivent gérer l'eau et cultiver des plantes résistantes à la sécheresse, influençant leur quotidien.

b. Quotient pluviométrique d'Emberger :

Cet indicateur vise à établir l'étage bioclimatique en se basant sur le diagramme bioclimatique d'Emberger et la formule suivante :

$$Q = \frac{2000.P}{M^2 - m^2} \dots \dots \dots (2.2)$$

Q : Coefficient de pluviométrie d'Emberger ; P : Précipitation annuelle moyenne (mm) ;

M : Température maximale moyenne du mois le plus chaud en Kelvin ; m : Température minimale moyenne du mois le plus froid en Kelvin.

$$M = 273 + 45.8 = 318.8$$

$$m = 273 + 5.1 = 278.1$$

AN : $Q = 1.89$

En tenant compte du diagramme bioclimatique d'EMBERGER (Fig2.5), qui dépend de la température moyenne minimale du mois le plus froid (m) et de la valeur de (Q), il est possible de conclure que notre zone d'étude se trouve dans : L'étage bioclimatique est caractérisé par un climat saharien, tandis que le sous-étage présente des conditions d'hiver tempéré.

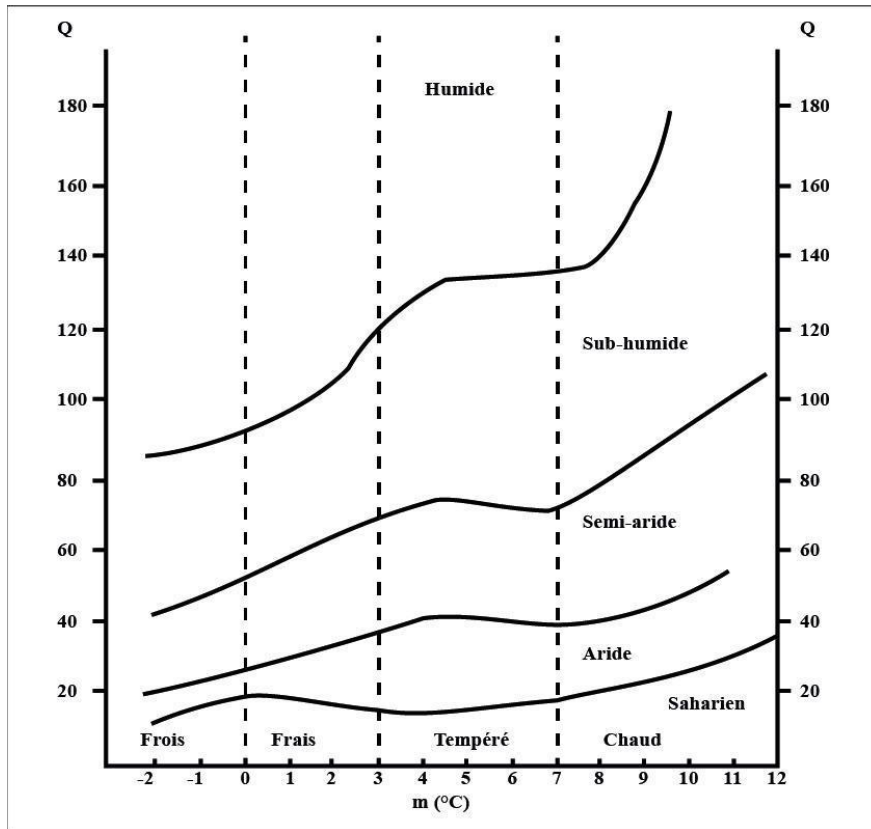


Figure 2.5: Diagramme bioclimatique d'EMBERGER.

Le diagramme ombrothermique de Gaussen constitue une représentation graphique dans laquelle les mois sont indiqués sur l'axe des abscisses, tandis que les précipitations sont affichées sur l'axe des ordonnées à droite, et les températures sur l'axe des ordonnées à gauche, utilisant une échelle double pour les précipitations.

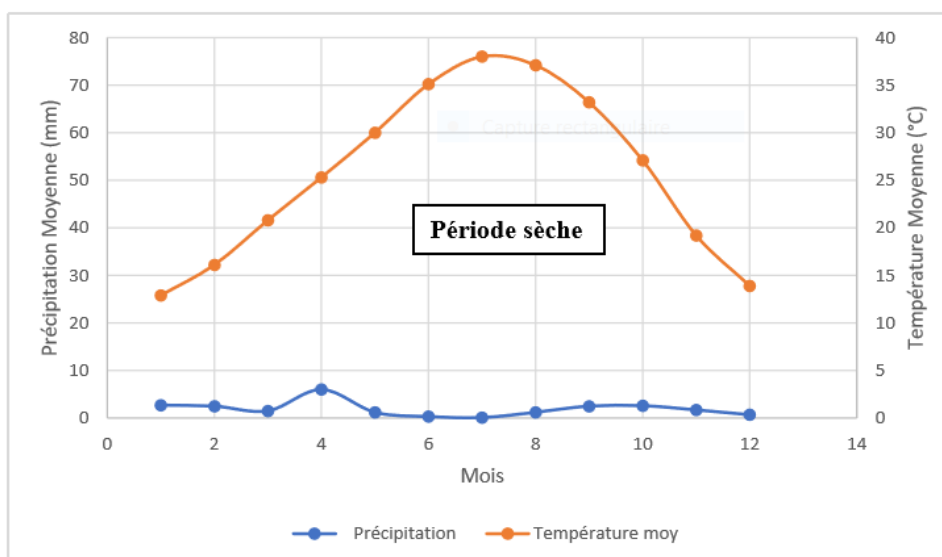


Figure 2.6: visualisation du diagramme bioclimatique d'EMBERGER.

Pour notre station, le graphique ainsi conçu indique que la saison sèche s'étend sur l'ensemble de l'année en raison des températures très élevées en comparaison avec les faibles niveaux de précipitations.

2.5. Les potentialités agricoles de l'année 2021 :

Tableau 2.7: Principales productions de la communes, (direction de l'agriculture d'Adrar, 2021).

Commune	Céréales	Fourrages	Cult-Maraic	Cult-Indust	sec	Dattes
Tamentit	1 230	10 305	17 687	69	46	15 440

Conclusion:

L'analyse des données climatiques de la station d'Adrar révèle une prédominance marquée d'une saison chaude, légèrement perturbée par quelques orages occasionnels. Le climat d'Adrar est caractérisé par une aridité saharienne, avec un hiver très court et tempéré, tandis que la saison sèche s'étend sur l'ensemble de l'année. Les facteurs combinés tels que la température élevée, l'insolation intense, l'humidité faible et la présence fréquente de vents chauds et secs contribuent à un pouvoir évaporant élevé, se traduisant par l'évapotranspiration potentielle (ETP) estimée à 2751 mm par an. Dans ce cadre, l'agriculture fait face aux défis d'un climat saharien rigoureux, entraînant des conséquences peu favorables. Pendant des siècles, les paysans de Tamentit ont su préserver un milieu fragile dans une région aride et hostile grâce à une gestion rationnelle de l'eau. Cette eau, essentielle à la création et à la survie de l'oasis, était exploitée avec des techniques traditionnelles et partagée collectivement. Cependant, l'introduction des motopompes et l'individualisme ont perturbé cet équilibre. Aujourd'hui, les autorités locales cherchent à restaurer ces anciennes méthodes d'irrigation et à sensibiliser les paysans à leur importance pour la survie de l'oasis.

CHAPITER3:

L'HYDRAULIQUE DE LA FOGGARA

3.1. Introduction:

Ce chapitre s'intéresse à l'analyse de l'état actuel et à la conception du réseau de la Foggara, un système d'irrigation ingénieux vieux de plus de dix siècles. Des mesures précises du débit initial, obtenues grâce à l'utilisation d'un micro-moulinet pour le jaugeage, permettent une évaluation précise et un dimensionnement adéquat du système. Introduite en Algérie il y a plus de 10 siècles, la Foggara témoigne du savoir-faire des populations d'antan face aux ressources limitées. Ce système ingénieux consiste en un ensemble de techniques permettant de capter et d'acheminer l'eau souterraine vers les oasis. La Foggara, bien que classée au patrimoine matériel, illustre l'ingéniosité et l'adaptation des communautés d'antan face aux contraintes de leur environnement. Ce système d'irrigation durable, vieux de plusieurs siècles, continue de fournir une source d'eau vitale pour les oasis et les populations qui y vivent.

3.2. Description du système hydraulique de la Foggara:

La construction d'une Foggara débute par le forage de puits de captage, appelés "tête de la Foggara", pour identifier des sources d'eau souterraine suffisantes. Une galerie souterraine, située entre 20 et 40 mètres de profondeur, est ensuite creusée sur une distance pouvant atteindre 10 à 15 kilomètres pour acheminer l'eau jusqu'à l'oasis. La prouesse réside dans la création d'une pente douce, avec un dénivelé de 1 à 2 millimètres par mètre, tout au long de la galerie. Des puits d'aération et d'accès, visibles à la surface, sont construits à intervalles réguliers. Ces puits servent à la fois à extraire les déblais issus du creusement de la galerie, à assurer l'aération, surtout en période de chaleur, et à protéger la galerie des éventuels éboulements. L'évaporation de l'eau à l'intérieur de la galerie contribue à humidifier le sol du "voûte de Tafza", prévenant ainsi les effondrements. Ces puits jouent également un rôle crucial dans le curage de la Foggara après des éboulements. A la sortie de la Foggara, on retrouve ce qu'on appelle la Kasria. Elle a une forme trapézoïdale/triangulaire et à la base, elle doit être imperméable. La Kasria remplit en premier lieu le rôle de stabilisation de l'eau et du débit à la sortie. Après avoir stabilisé l'eau de la Foggara, la Kasria commence la répartition. Au début, l'eau nécessaire à la vie du Ksar (pour boire, pour se laver et pour la mosquée) est gratuite. En sortant du Ksar à l'arrivée de l'Oasis, une nouvelle Kasria est construite dans le but de répartir l'eau sur les jardins. Cette répartition se fait à travers un Kiel Elma (le mesureur d'eau) disposant d'un registre pour chaque Foggara dans lequel sont mentionnés le nom et la part de chaque participant. Ceci inclut leur argent, leur travail ou leurs esclaves ayant permis à

cette eau d'atteindre les jardins. La distribution se fait publiquement en présence des propriétaires d'eau des acquéreurs, sous forme d'enchères.

L'eau est répartie selon une unité de mesure appelée El Kirat (Quarat), également connue sous le nom d'El Habba. Ce Kirat est mesuré en référence au noyau de caroubes. Le Kiel dispose d'une plaque métallique comportant des trous, le plus petit étant le Karat et les autres plus grands étant des multiples de cette unité de base. Lorsqu'une personne achète un certain nombre de Karat d'eau, le Kial ajuste la plaque pour permettre la sortie de la quantité achetée, qui va directement dans une Saguia. Il est possible qu'à la sortie de cette Kasria, quatre ou cinq ou plus acheteurs s'associent dans une Saguia, dans laquelle les mesures de leurs jardins sont prises en compte, même s'ils sont éloignés. Cette Saguia traverse d'autres jardins (sans que quiconque n'y touche) jusqu'à arriver aux jardins des personnes concernées, où une autre Kasria est installée pour garantir les droits de chaque acheteur.

L'eau de la Saguia est déversée dans un Madjen (un bassin construit dans le jardin, dont la base et les côtés sont souvent en argile pour assurer une imperméabilité maximale). Comme l'eau de la Saguia coule jour et nuit, le bassin se remplit selon les saisons. Les paysans choisissent les heures pour libérer l'eau du Madjen dans leurs jardins (généralement tôt le matin et l'après-midi).

La région est réputée pour ses fortes chaleurs en été. Cette chaleur affecte l'eau d'irrigation et provoque une évaporation importante, ce qui conduit à la formation d'une croûte de sels sur les sols à la fin de l'été. Pour permettre la relance des cultures de l'année suivante, les paysans sont tenus de nettoyer les sols et se débarrasser de cette croûte de sels. Cette eau à forte teneur en sels est rejetée à travers des rigoles spéciales vers la Sebkha. Il convient de noter que la Sebkha se situe à un niveau plus bas que les jardins, conformément au principe naturel selon lequel l'eau suit la pente.

Le dernier maillon de cette chaîne vitale de la Foggara, qui a traversé de longues distances dans le sous-sol, puis le Ksar, les jardins et enfin la Sebkha, est essentiel pour assurer la durabilité et la prospérité de la région.

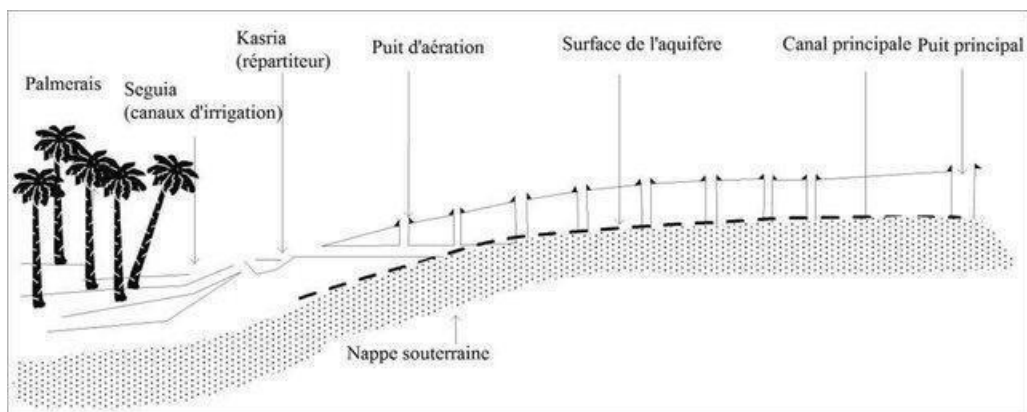


Figure 3.1: Schéma d'une Foggara (Ghodbani, 2015)

3.3 Hydrométrie traditionnelle

L'hydrométrie traditionnelle repose sur des règles strictement appliquées par les propriétaires des Foggara, au sein d'une organisation sociale profondément attachée à ses héritages. Dans ce système, l'eau appartient à une tribu ou à un groupe appelé **Djema**. Chaque groupe ou tribu détient un registre précis des parts de chaque copropriétaire, et la part de chacun est minutieusement mesurée et calculée. Cette approche ancestrale garantit une gestion équitable et transparente des ressources hydriques, tout en préservant les coutumes et les valeurs culturelles transmises de génération en génération.

Le partage de l'eau au sein de la Foggara obéit à des règles strictes et précises. Tous ceux qui ont contribué à l'établissement de la Foggara, que ce soit par leur travail ou leurs capitaux, participent à une première répartition, essentiellement théorique.

Initialement, on attribue à chaque participant une part proportionnelle à sa contribution. L'eau est divisée en unités appelées "Guesma" (part d'eau), chaque "Guesma" se subdivisant ensuite en "Kasria". Ces dernières se décomposent à leur tour en unités plus petites, appelées "Habba" ou "Habba sghira". Curieusement, les parts d'eau de chaque copropriétaire sont déterminées, parfois même avant l'achèvement des travaux, selon un mode de calcul original qui ne tient pas compte du débit réel de la Foggara. Chaque Foggara possède un registre où sont inscrits les nombres de parts revenant à chaque propriétaire.

3.3.1 La mesure de l'eau:

Dans la région aride du Touât, l'eau est une ressource précieuse et vitale. Sa gestion équitable est donc d'une importance capitale pour la survie des communautés oasiennes. C'est pourquoi, depuis des siècles, les habitants du Touât ont développé un système ingénieux de partage de l'eau basé sur la distribution de volumes. Ce système repose sur un instrument traditionnel appelé Luh ou Louh, une plaque de cuivre percée de trous de différentes tailles. Ces trous,

disposés en rangées, représentent des unités de débit précises, permettant de mesurer et de répartir l'eau de manière juste entre les différents utilisateurs. Le Louh se distingue par sa forme cylindrique et le nombre de rangées de trous qu'il comporte. Dans la région de Touât, on trouve généralement des Louhs à une ou trois rangées. Rangée supérieure : La rangée supérieure, composée de trous équidistants, correspond à un huitième du débit total. Chaque trou représente donc un huitième de l'eau disponible. Rangée du milieu : La rangée du milieu, ou rangée centrale, représente des fractions de huitième : $1/2$, $1/4$, $1/6$. Ces trous permettent de distribuer des quantités d'eau plus précises, en fonction des besoins spécifiques de chaque utilisateur. Rangée inférieure : Enfin, la rangée inférieure indique les multiples de huitième : 10, 15, 20, etc. Ces trous servent à mesurer des débits plus importants, généralement pour l'irrigation de grandes parcelles de terre. Le système de mesure du Louh s'effectue par une série de jaugeages successifs. En plaçant le Louh à l'ouverture d'un canal ou d'une foggara, on observe le nombre de trous que l'eau parvient à remplir. En fonction de la rangée et de la taille des trous submergés, on peut déterminer le débit exact de l'eau qui s'écoule. Ce système traditionnel de partage de l'eau, basé sur le Louh, témoigne de l'ingéniosité et du savoir-faire des communautés oasiennes du Touât. Il a permis pendant des siècles une gestion équitable de cette ressource vitale, garantissant la survie et la prospérité des oasis dans un environnement aride.

3.3.2 L'unité de mesure de la Foggara :

L'unité de mesure utilisée dans le système d'irrigation traditionnel des oasis du Touât est appelée **Habba** ou **Habba Zrig**. Dans certaines régions, elle est également connue sous le nom de Nouba. Cette unité correspond à un huitième ($1/8$) du débit total d'eau. Concrètement, elle équivaut approximativement au débit fourni par une ouverture d'environ 1 à 1,5 centimètre de diamètre, soit environ 2,6 litres par minute. Il est important de noter que le nombre de Habba peut varier d'une région à l'autre. Le système de mesure du Habba s'appuie sur un instrument traditionnel appelé Luh ou Louh. Cet instrument, constitué d'une plaque de cuivre percée de trous de différentes tailles, permet de jauger le débit d'eau en fonction du nombre de trous submergés. La rangée supérieure du Luh correspond à un huitième du débit total, tandis que les rangées inférieures représentent des fractions ou des multiples de ce huitième. L'unité de mesure Habba joue un rôle crucial dans la gestion équitable de l'eau. En permettant de quantifier le débit d'eau avec précision, elle facilite la répartition de cette ressource précieuse entre les différents utilisateurs, en fonction de leurs besoins spécifiques. Chaque utilisateur se voit attribuer un nombre défini de Habba, proportionnel à la surface de

sa terre et aux besoins en eau de ses cultures. Ce système garantit une distribution juste et transparente de l'eau, évitant ainsi les conflits et les tensions entre les utilisateurs. Il est important de souligner que l'unité de mesure Habba peut varier d'une région à l'autre. De même, la plaque de jauge (Luh) peut présenter des différences selon les régions. Ces variations s'expliquent par des besoins et des pratiques agricoles spécifiques à chaque zone géographique. A noter que :

Tableau 3.1 : l'historique de débit d'Anhil en unité de mesure Habba.

L'unité	Mesure1906	Mesures2011	Mesures2022	Mesures2024
1Haba=2.6l/min	159Habba= 413l/s	1.92Habba=5l/s	3.85Habba= 10 l/s	1.92Habba=5l/s

3.3.3 Arithmétiquement et le droit du système de la Foggara :

La gestion précise de l'eau par un système d'enregistrement rigoureux et une arithmétique complexe. Chaque foggara possède un registre officiel des parts de chaque propriétaire, protégé par des procédures strictes de modification. Le débit fictif invariable de chaque foggara, base de calcul des parts, peut différer du débit réel mesuré par la plaque de jauge (Luh). La part juridique de chaque propriétaire est exprimée en "eau fictive" et calculée selon une arithmétique de base 24, en utilisant des unités comme le kirat, le kirat du kirat et le thmène. Cette précision est essentielle pour des opérations complexes comme la vente, la location ou des travaux sur la foggara. Pour expliquer : Si une personne désire entreprendre des travaux d'allongements sur une foggara de quelques centaines de mètres, qu'il soit déjà copropriétaire ou non, il doit obtenir le consentement du groupe (djema). Si l'accord est obtenu, on mesure le débit de la foggara puis il est noté sur le registre. Il fait effectuer les travaux durant un an par exemple, une fois les travaux achevés, il avise la djema et il coupe la foggara au niveau du premier puits qu'il a fait forer, il faut attendre dix jours afin que le débit se stabilise (Kobori, 1982). La gestion de l'eau au sein des foggara repose sur un système collectif bien établi. Le groupe (ou djema) se réunit pour effectuer une première mesure du débit de la foggara. Si le débit actuel est inférieur à celui enregistré avant les travaux, une étape cruciale intervient : le curage de l'ancien tronçon. L'objectif est de rétablir le débit initial. Après le curage, il faut attendre quelques jours pour que le débit se stabilise. Une nouvelle mesure est alors réalisée pour vérifier que la foggara a retrouvé son débit initial. Si le déficit était causé par un utilisateur spécifique, celui-ci doit retirer le bouchon qu'il avait placé au niveau de son premier puits. Dix jours plus tard, une dernière mesure est effectuée

pour évaluer l'amélioration du débit. Si, dans le cas contraire, le niveau d'eau est supérieur à celui enregistré avant les travaux, l'utilisateur responsable devient propriétaire de 50% de nouvelle eau. Les 50% restants sont attribués aux autres utilisateurs de la foggara. Ce système traditionnel garantit une gestion équitable de l'eau, favorisant ainsi la pérennité de ces précieux canaux d'irrigation.

Tableau 3.2: La habba et les nombres fractionnaires de la habba (kobori, 1982).

Désignation	Symboles	Equivalent en Habba
1 Habba	●	24Kirat=Habba
1Kirat de Habba	●	1/24
2Kirat de Habba	● ●	2/24
1/8de Habba	● ● ●	3/24
1/6 de Habba		4/24
1/4 de Habba	●●	6/24
1/3de habba		8/24
1/2de Habba		12/24
24 Kirat de Habba		24/24

Tableau 3.3: Le nombre fractionnaire du Kirat (Kobori, 1982).

Désignation	Symboles	Equivalent en Kirat
1Kiratdu Kirat	●	1/24
2Kiratdu Kirat	●●	2/24
1/8Kiratdu Kirat	●●●	3/24ou3Kiratdu Kirat
1/6Kiratdu Kirat	—	4/24
1/4kiratd uKirat	●● --	6/24
1/3Kiratdu Kirat	=	8/24
1/2Kiratdu Kirat	≡	12/24
1Kirat	≡≡	24/24

Calcul de la part juridique:

Une fois la mesure est faite correctement sous l'œil vigilant des propriétaires présents, la

comptable (el Hassab) fait l'addition suivant les nombres graves dans la tablette pour obtenir le débit réel: le chahed annonce le débit juridique de tous les propriétaires, dans notre exemple est de 350 Habba. El hassab pratique sa comptabilité en faisant des opérations avec des points et des tirets : cette comptabilité compliquée prend sa base sur le nombre complexes :

En multipliant par 24 le nombre réel de Habba données par la Foggara, n'obtient le nombre de Kirat, on divise ce résultat par la part juridique de tous les propriétaires, le quotient est égal à la valeur de la part juridique suivant le calcul. (Kobori, 1982).

Conversion des habbas en Kirat: $xyz \times 24 = 8400k$

3.4 Situation actuelle de la Foggara:

3.4.1 Situation hydraulique: Débit

D'après les mesures effectuées sur le terrain, le débit actuel est environ à $Q \approx 5l/s$. La longueur de la Foggara: Selon le tracé du réseau de la Foggara, nous avons constaté que sa longueur totale dépasse les 6 kilomètres.

3.4.2 La consommation de l'eau:

Principalement, l'eau de la Foggara d'Anhil est dérivée pour l'irrigation des jardins des propriétaires. Cependant, une partie de cette eau est également mise à disposition des habitants pour la consommation, l'hygiène et d'autres utilisations quotidiennes, selon les données du recensement agricole, près de 40 fellahs bénéficient de cette Foggara. Et pour les autres ressources hydrauliques nous distinguons à proximité du réseau de la Foggara, à moins de 20 mètres, se trouve un château d'eau d'une capacité de 250 m³, qui alimente le Ksar de Sidi Ouali.

3.4.3 Occupation des terres :

À partir des images satellites, il est clairement visible que les terres sont occupées par des exploitations agricoles, alignées le long du réseau de la Foggara. Ces terres sont la propriété des titulaires de la Foggara. L'estimation de la superficie totale de ces terres dépasse les 29 hectares, selon le recensement en 2022.

3.4.4 Information sur la réhabilitation:

Il y a une augmentation de la rareté de l'eau pour plusieurs raisons telles que la sécheresse, l'augmentation des besoins en eau, et le pompage excessif des nappes au-delà de leur capacité. La pénurie des ressources hydrauliques est un défi majeur pour les espaces oasiens, où il y a un déséquilibre entre la croissance de la population et les ressources en raison du manque d'ajustement entre la capacité du milieu et le nombre de personnes. Lors de notre enquête sur le terrain, nous avons identifié des améliorations apportées au système de la Foggara (fig 3.2

et fig 3.3). Parmi les aménagements relevés, nous avons noté que : Une portion significative de d'Aghisrou a subi des modifications, notamment l'ajout de maçonneries en béton.



Figure 3.2: Photos sur terrain d'Aghisrou aménagé.



Figure 3.3: Photos sur terrain d'Aghisrou aménagé.

Certains puits ont été équipés de blocs de ciment, améliorant leur durabilité et fonctionnalité (fig.3.3). Ces aménagements protègent des infiltrations de terre et des débris, facilitent l'accès à l'eau et préviennent la contamination en créant une barrière contre les polluants. Ainsi, les puits deviennent plus sûrs et efficaces pour répondre aux besoins en eau des communautés, ce qui est crucial dans les régions à accès limité à l'eau potable.



Figures 3.4: L'état des puits modernisés.

Des modifications ont même affecté la kasria principale fig. 3.5, qui a été reconstruite, et un mur a été érigé pour la protéger. De plus, les seguias sont désormais revêtues de ciment ou de conduites en PVC, comme le montrent la fig 3.6, reflétant ainsi l'état actuel de la Foggara.



Figure 3.5: l'état actuel de la Kasria principale.



Figure 3.6: Une saguia ancienne remplacée par une conduite en PVC.

3.4.5 L'état de la galerie:

Suite à des investigations sur le terrain et à l'aide d'entretiens avec l'un des propriétaires responsables de l'aménagement de cette Foggara, nous avons constaté que la section antérieure de la partie drainante présente des variations. Parfois, elle est suffisamment large pour permettre la marche à l'intérieur, tandis que d'autres fois, elle est si étroite qu'il est impossible de passer d'un point à un autre, même en rampant. Ces variations peuvent être dues à des éboulements du terrain ou à la nature des matériaux constitutifs, qui se révèlent difficiles à briser, même avec l'utilisation d'un marteau.

3.4.6 Etat de la structure:

Examinons en détail la structure de la Foggara et ses différentes parties, en tenant compte des observations que vous avez faites sur le terrain : **Partie Drainante:** La partie drainante de la Foggara présente des variations. Elle peut être semi-circulaire, ce qui facilite son creusement, surtout avec les moyens anciens disponibles à l'époque de sa construction. Cependant, dans certaines sections (comme l'Aghisrou), des aménagements plus récents en briques et ciment ont donné une forme rectangulaire. **Kasria (Structure de Distribution):** La Kasria, qui régule la distribution de l'eau, a une forme trapézoïdale pour des raisons techniques. Cette forme permet de réduire la vitesse de l'eau, assurant un partage équitable entre les utilisateurs. On peut observer les traces anciennes de la saguia d'origine, qui avait une forme rectangulaire, bien que ses dimensions fussent plus modestes par rapport aux autres parties de ce système traditionnel. **Conduites:** Les conduites à ciel ouvert (saguia) ont été remplacées par des conduites en PVC. Cette modernisation vise à réduire la fréquence des entretiens nécessaires. **Madjen (Bassin de Stockage):** Le Madjen est le bassin où l'eau est accumulée et stockée. Sa forme reste généralement rectangulaire, car elle est plus facile à réaliser. La Foggara, avec ses caractéristiques uniques et son rôle vital dans la gestion de l'eau dans les oasis, continue de fasciner et d'inspirer.

3.5 Conditions naturelles:

Il y a eu une diminution significative du niveau statique des eaux souterraines, atteignant une profondeur de 12 mètres dans certaines régions. La profondeur de l'eau est passée de 6 mètres à 18 mètres, ce qui a entraîné la disparition de nombreuses sources qui jaillissaient d'une altitude supérieure à cette profondeur.

Causes de la baisse du niveau statique des eaux souterraines: La sécheresse qui a affecté la région et les sources d'alimentation de la nappe phréatique souterraine alimentant les sources

est l'une des principales causes de la baisse du niveau statique des eaux souterraines. Même si nous ne disposons pas de données climatiques pour le confirmer, la durée de la sécheresse des vallées et les vestiges d'arbres dispersés dans les déserts indiquent qu'il y a eu des précipitations importantes dans un passé récent. La multiplication des puits et l'utilisation de l'énergie électrique ont entraîné l'abandon des méthodes de pompage traditionnelles au profit de méthodes modernes, ce qui a conduit à une augmentation de la profondeur des puits et de la quantité d'eau pompée. Cela s'ajoute aux puits profonds équipés de pompes puissantes.

Dégradation des travaux de forage et d'entretien : Autrefois initiés en début d'été, les travaux de maintenance des sources, comprenant le nettoyage des accès, le forage et le raccordement des puits, ont connu une forte diminution, voire une disparition totale dans certains cas. Cette situation s'explique par un système social inégalitaire où un petit nombre d'individus, voire une seule famille, détient le contrôle d'un grand nombre de sources. Face aux changements socio-économiques, certains propriétaires ont délaissé l'entretien par manque de moyens, tandis que d'autres n'en ont plus la volonté. Pénurie de main-d'œuvre qualifiée et migration vers d'autres secteurs : Le travail dans les sources, exigeant une expertise et un savoir-faire particuliers, peine à attirer les jeunes générations. De plus, le vieillissement de la main-d'œuvre qualifiée aggrave la pénurie. Difficultés et dangers inhérents au travail dans les sources : La pénibilité et les risques associés au travail dans les sources dissuadent de nombreux individus, les incitant à se tourner vers des secteurs moins ardues.

Diminution du rôle des sources : Autrefois vitales pour l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable et diverses coutumes, les sources ont perdu de leur importance avec l'arrivée de l'eau courante et d'alternatives plus modernes.

Effondrement et contamination des sources : La nature géologique des sols, les fuites d'eau des réseaux et une mauvaise ventilation peuvent entraîner l'effondrement de certaines sources. D'autres sources subissent une contamination par des déchets, des fuites d'eaux usées ou l'utilisation de puits individuels à des fins d'assainissement.

3.5.1 Plan de développement local:

La Foggara d'Anhil a bénéficié d'un aménagement en 2016 d'un montant d'environ 7 millions de dinars algériens. Actuellement, la Foggara bénéficie d'un nouvel aménagement en 2024, d'un montant de plus de 11 millions de dinars algériens. Dans ce dernier cas, l'entreprise réalisatrice doit mettre en place une nouvelle déviation en béton.

3.5.1 L'état de l'aménagement Foggara:

Cette Foggara alimente quelques Jardins des propriétaires qui la somme des surfaces de ces

vergeretenviron29hectares, en plus la quantité d'eau de cette Foggara estestimera350habba, bien partager selon le Zmam (le registre juridique de la Foggara). La modernisation a impacté l'ensemble du système de la Foggara (fig.3.7) et a entraîné des modifications touchant le concept même de ce système ancestral d'irrigation.

Au niveau des puits:



Figure 3.7: L'état actuelle des quelques puits de la Foggara.

Tableau 3.4: description des photos précédents.

L'ouvrage	L'état
Puits d'aérations sur quelque parties	De nombreux puits de la Foggara ont été modernisés avec des structures de regards en ciment et béton armé pour prévenir Les éboulements et autres accidents.

Au niveau du Kasria:

Les changements apportés à la Kasria sont indiqués en rouge (fig 3.8), facilitant leur identification. Ces ajustements peuvent inclure des mises à jour de contenu, des corrections d'erreurs ou des améliorations de présentation (fig 3.9). L'utilisation du rouge permet aux lecteurs de repérer facilement les modifications par rapport à la version précédente, simplifiant ainsi le suivi des évolutions du document ou de la plate-forme.



Figure 3.8: La Kasria principale aménagée.

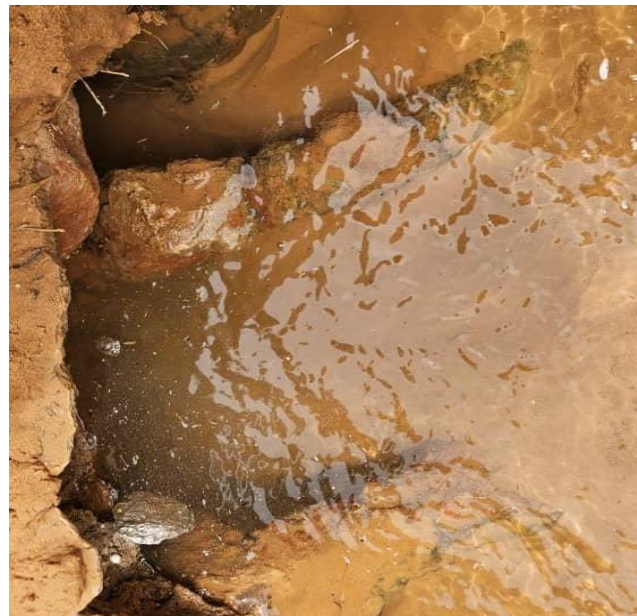


Figure 3.9: Les défauts subis à la kasria.

Tableau 3.5: description de l'état actuelles des Kasriat

L'ouvrage	L'état
Kasriat principale, secondaire et tertiaire.	Les modifications qui ont touché la Kasria incluent la reconstruction des parois en ciment et Gravier. Deplus, les sorties des parts juridiques des propriétaires sont désormaisen PVC, Acheminées soit vers les Madjens, soitvers d'autres Kasriat.

Au niveau des Madjen:



Figure 3.10: Un Madjen en ciment.

Tableau 3.6: description des aménagements des Madjen.

L'ouvrage	L'état
Madjen	Ces basins ont bénéficié d'un changement de matière première pour leur construction. Initialement principalement en argile en raison de ses propriétés imperméables, ils ont été Remplacés par du ciment et des blocs de béton.

3.1. Objective du mémoire :

Le présent mémoire vise à établir un diagnostic précis des dégradations affectant le système

de foggara et à proposer des solutions de réhabilitation adéquates. La foggara, un système d'irrigation traditionnel ingénieux, a subi des dommages importants au cours des dernières années, mettant en péril sa pérennité et son rôle vital dans le maintien des équilibres environnementaux et socio- économiques de la région. Diagnostic, L'observation attentive du terrain révèle des dégradations conséquentes affectant le système de foggara, témoignant d'une situation préoccupante. Ces dégradations se manifestent sous diverses formes, notamment :

Ensemblement des galeries : L'accumulation progressive de sable dans les galeries souterraines entrave la circulation de l'eau, réduisant ainsi le débit et la disponibilité de la ressource en eau.

Affaissement des puits : Les puits d'accès aux galeries souterraines se sont affaissés, rendant l'accès et l'entretien des foggara plus difficiles, voire impossibles.

Détérioration des infrastructures : Les infrastructures de surface, telles que les bassins de collecte et les canaux de distribution, présentent des signes importants de dégradation, entraînant des pertes d'eau et une inefficacité du système d'irrigation.

Déforestation : La disparition progressive de la couverture végétale dans les bassins versants contribue à l'érosion des sols et à l'augmentation du débit des eaux pluviales, fragilisant davantage les infrastructures de la foggara.

Solutions de réhabilitation

Face à l'ampleur des dégradations constatées, il est impératif de mettre en œuvre des solutions de réhabilitation efficaces et durables pour assurer la pérennité du système de foggara. Ces solutions doivent s'inscrire dans une approche globale et concertée, prenant en compte les dimensions environnementales, socio-économiques et culturelles du système.

3.6 La méthodologie:

En utilisant les informations fournies par des institutions publiques et privées, et avec l'accompagnement de mon superviseur, Monsieur Remini, ainsi que de Monsieur Boutadara, nous avons réalisé des visites sur le terrain afin de collecter des données sur l'état actuel des foggaras, en tenant compte des modifications et des dommages subis. La réhabilitation d'une foggara représente un processus complexe qui requiert une méthodologie rigoureusement définie. Abordons d'abord les aspects de la collecte des données, car une compréhension approfondie du contexte est cruciale pour assurer le succès de la réhabilitation. Les étapes clés pour collecter les données nécessaires à la réhabilitation d'une foggara :



Figure 3.12: les propriétaires d'une Foggara.



Figure 3.13: Visite du projet de réalisation des aménagements.



Figure 3.14 : visite du terrain.

Mai2024: Prélèvement d'échantillons d'eau (fig3.15, 3.16) destinés à des analyses de qualité d'eau en laboratoire par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH).



Figure 3.15: prélèvement d'un échantillon d'eau.



Figure 3.16: l'étude de d'un échantillon au sein de laboratoire de ANRH.

Juillet-Août2024: Réalisation de diverses mesures de débit, de la superficie des parcelles et de l'ensemble du réseau (Kasriat, Saguiat, Madjens) (fig 3.17, 3.18, 3.19). Ces données ont été utilisées pour élaborer un plan détaillé et évaluer avec précision le débit actuel ainsi que l'état général de la foggara.



Figure 3.17: visite du projet d'aménagement de la Foggara.



Figure 3.18: Visite du terrain pour le prélèvement des mesures du Kasria.

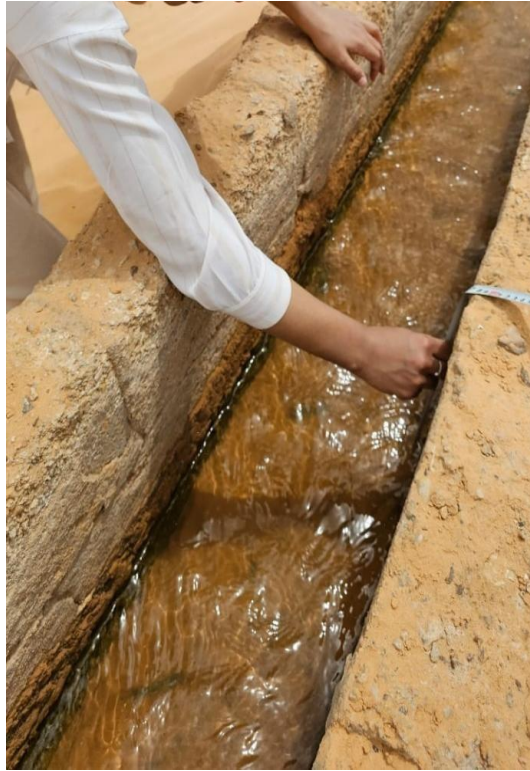


Figure 3.19: Visite de terrain pour les prélèvements des mesures des Saguia.

Enquêtes et entretiens : Des entretiens ont été conduits avec les propriétaires, les utilisateurs et les experts locaux afin de rassembler des informations sur l'historique, les problèmes rencontrés et les besoins spécifiques liés à la foggara.

Observations sur le terrain: malgré tous les obstacles qui sont gênés cette étape mais des observations minutieuses ont été réalisées le long de la foggara, permettant d'identifier les zones dégradées, les fissures, les obstructions et les éléments nécessitant des réparations. Des photographies ont été prises pour documenter l'état des lieux.

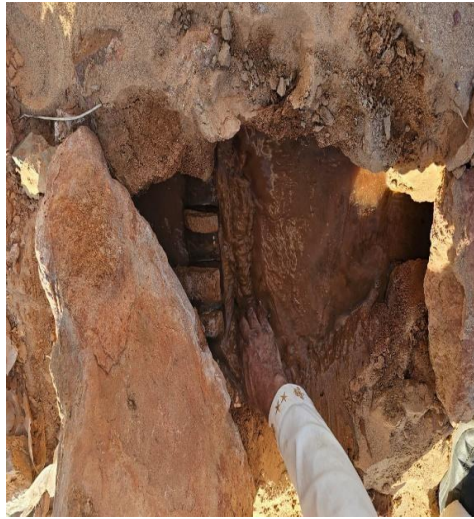


Figure 3.20: Une Kasria qui été enterrée.

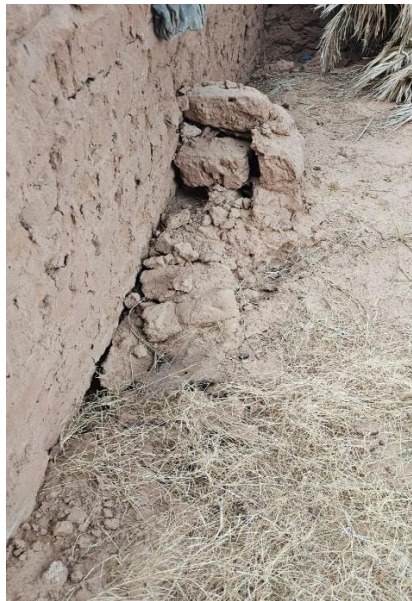


Figure 3.21: les observations obtenues sur le terrain (Kasria cassée).

Mesures hydrauliques: Des mesures de débit ont été effectuées à divers points de la foggara à l'aide de débitmètres. Des échantillons d'eau ont également été prélevés pour des analyses en laboratoire (pH, turbidité, minéraux).

Une étude documentaire a été réalisée en consultant l'ANRH, la Direction de Ressources en Eaux(DRE), l'Agence de Gestion et d'Aménagement des Ressources en Eaux (AGIRE) ainsi que d'autres sources pertinentes. Cette démarche visait à examiner des recherches antérieures, des rapports, des cartes historiques et des archives. Par ailleurs, des données relatives au climat et à la Géologie ont également été rassemblées.

Analyse des données: Croisez les données collectées pour identifier les causes profondes des dégradations. Évaluez les contraintes socio-économiques et environnementales qui ont affecté la foggara.

Planification de la réhabilitation: Sur la base des données, élaborer un plan de réhabilitation. Cela peut inclure des réparations structurelles, des améliorations hydrauliques, et des mesures pour préserver la valeur patrimoniale. Impliquez les propriétaires et les utilisateurs dans la planification pour garantir leur adhésion.

Suivi continu: Mettez en place un système de suivi pour évaluer l'efficacité des mesures de réhabilitation. Récoltez des données après les travaux pour comparer avec les données initiales. Enfin, rappelez-vous que la réhabilitation d'une foggara ne se limite pas à la collecte de données. Elle nécessite également une approche participative, une sensibilisation locale, et une gestion durable pour assurer sa pérennité.

3.7 Conditions naturelles du terrain:

3.7.1 La capacité de la nappe:

La zone de Tamentit est connue pour sa capacité en eau, où l'on peut remarquer plusieurs forages et puits exploités autour du système de la foggara. On y trouve également un château d'eau à côté de l'Aghisrou de la foggara, alimenté par un forage situé à 4 km du dernier puits de la partie drainante de la foggara. Il existe aussi un puits exploité pour l'AEP à 40 mètres de la kasria principale de cette foggara. Ces puits et forages sont déclarés au près de l'ANRH. Cependant, certains puits dans le périmètre d'irrigation de la foggara d'Anhil ne sont pas déclarés par les propriétaires, afin de couvrir les besoins des fellahs et d'aider le système de la foggara.

3.7.2 L'hydrologie:

L'objectif de l'étude hydrologique est d'analyser les caractéristiques des précipitations pour une fréquence spécifique. Cela est essentiel pour évaluer les besoins en eau des cultures. Cette recherche s'appuiera sur les données climatiques recueillies à la station de l'Aéroport d'Adrar – Touât,- Cheikh Sidi Mohamed Belkebir, sur une période d'observation de 30 ans (1990-2019) dans le tableau 7 des coordonnées de la station :

Coordonnées		Altitude (m)
X (Km)	Y (Km)	
776,60	3082,66	276

Tableau 3.7: Données de précipitations mensuelles de la station de l'Aéroport d'Adrar sur une période de 30 ans (ONM Adrar)

Année	SEP	OCT	NOV	DE C	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AO U	ANNUE L
1990	0	0	0	0	0	0	0	92.97	0	0	0	0	92.97
1991	0	0	1.02	0	0.51	0	0	0	2.03	0	59.94	0	63.5
1992	0	0	1.02	0	0.25	3.05	0	1.02	0	0	0	0	5.34
1993	0	0.25	3.05	0	0	3.56	0	0	0	0	0	1.02	7.88
1994	1.02	0	0	0	2.54	0	31.5	0	0	10.2	35.05	0	80.32
1995	2.28	0.51	1.02	12.2	0	0	0	0	0	0	0	0	16.01
1996	0	0	0	0	0	7.12	7.62	0	7.11	0	2.03	0	23.88
1997	0	19.56	0	0	0.51	0	0	4.06	49.3	0	0	2.03	75.48
1998	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.02	0	0	1.02
1999	0	0	27.18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27.18
2000	0	0.25	0	0	0	0	0	0	1.78	0	0	0	2.03
2001	0	0.76	0	0	0	0	0	0.76	0	1.02	0	0.51	3.05
2002	0	3.05	0	0	0	0	0	0	0	0	11.7	0	14.75
2003	0	0	3.05	0	0.51	13.46	0	0	0	0	0	3.05	20.07
2004	0	0	2.03	2.03	0	2.54	13.97	37.08	0	0	0	0	57.65
2005	0	0	0	0	0	0	7.87	0	0	7.11	0	0	14.98
2006	0	0	0.51	0	0.76	2.03	0	0	3.06	0	0	0	6.36
2007	2.03	0	0	0	0	0	1.02	0	0	0	0	3.04	6.09
2008	3.05	41.9	0	1.02	0	5.33	2.03	0	0	0	0	0	53.33
2009	3.56	0	0	0	18.03	0	8.13	0	0	0	0	0	29.72
2010	8.89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.89
2011	0	0.51	0	0	0	1.02	3.05	0	0	0	0	0	4.58
2012	0	0	0	0	1.02	0	0	0	0	0	1.02	0	2.04
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0.76	1.02	0	0	1.78
2014	0	1.02	2.54	0	1.02	0	0	0	0	1.02	0	1.01	6.61
2015	0.25	0	0	0	0	0.51	0	0	0	0	0	9.14	9.9
2016	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0	0	0	0.25
2017	7.11	0	0	12.2	1.02	0	1.02	0	5.59	0	0	0	26.94
2018	34.03	0.76	2.03	0	0	3.05	0	2.03	0.25	0	0	1.02	43.17
2019	3.05	0.76	0	0	0	0	0.51	0	0	0	0	0	4.32

3.7.2.1 Étude de l'homogénéité de la série pluviométrique:

Afin d'évaluer l'homogénéité de la série de données pluviométriques, on recourt au Test de Wilcoxon, également désigné comme le test des rangs, qui est reconnu comme le test non

paramétrique le plus efficace. Considérons deux variables aléatoires, Y et X, représentant respectivement deux séries de précipitations annuelles détaillées N1 et N2 (tableau 3.9). Ici, Y est la série à analyser, tandis que X constitue la série de référence, avec N2 supérieur à N1. Il est à noter que le nouvel échantillon YUX provient également de la même population que l'échantillon initial.

Les éléments de ce nouvel échantillon YUX sont classés par ordre décroissant, et à chaque valeur est attribué le rang correspondant dans cette série. En cas de répétition d'une valeur, il convient de lui attribuer le rang moyen qu'elle représente, les résultats sont exprimés dans les tableaux 8 et 9.

Nous déterminons les valeurs de Wy et Wx:

Wy/x correspond à la somme des rangs de Y, qui est notre principal intérêt et se calcule comme suit :

$$\begin{cases} W_y = \sum_{i=1}^n \text{rang } Y = 1 + 3 + \dots + 13 + 17 + \dots + N \\ W_x = \sum_{i=1}^n \text{rang } X = 2 + 4 + \dots + 14 + 15 + \dots + N - 1 \end{cases}$$

L'hypothèse est considérée comme valide si:

$$W_{\min} = \left[\left(\frac{(N_1 + N_2 + 1) \times N_1 - 1}{2} \right) - 1.96 \sqrt{\frac{N_1 \times N_2 (N_1 + N_2 + 1)}{12}} \right]$$

$$W_{\max} = [(N_1 + N_2 + 1) \times N_1 - W_{\min}]$$

On trouve :

Tableau 3.8: Les conditions du test d'homogénéité.

Wmin	Wy	Wmax
63.27	112	188.73

Tableau 3.9: Test d'homogénéité de Wilcoxon pour la série de la station.

e	Série d'origine	Séries-Y	Série X	Ordre Décroissant	XUnionY
1	92.97	92.97	2.03	92.97	Y
2	63.5	63.5	3.05	80.32	Y
3	5.34	5.34	14.75	75.48	Y
4	7.88	7.88	20.07	63.5	Y
5	80.32	80.32	57.65	57.65	X
6	16.01	16.01	14.98	53.33	X
7	23.88	23.88	6.36	43.17	X
8	75.48	75.48	6.09	29.72	X
9	1.02	1.02	53.33	27.18	Y
10	27.18	27.18	29.72	26.94	X
11	2.03		8.89	23.88	Y
12	3.05		4.58	20.07	X
13	14.75		2.04	16.01	Y
14	20.07		1.78	14.98	X
15	57.65		6.61	14.75	X
16	14.98		9.9	9.9	X
17	6.36		0.25	8.89	X
18	6.09		26.94	7.88	Y
19	53.33		43.17	6.61	X
20	29.72		4.32	6.36	X
21	8.89			6.09	X
22	4.58			5.34	Y
23	2.04			4.58	X
24	1.78			4.32	X
25	6.61			3.05	X
26	9.9			2.04	X
27	0.25			2.03	X
28	26.94			1.78	X
29	43.17			1.02	Y
30	4.32			0.25	X

Par conséquent, la condition de Wilcoxon est satisfaite, ce qui indique que la série des précipitations annuelles enregistrées à la station de l'Aéroport d'Adrar est homogène.

3.7.2.2 Ajustement de la série pluviométrique:

Les séries de précipitations peuvent souvent être adaptées aux lois statistiques, ce qui est fortement recommandé pour obtenir des résultats plus fiables. Les lois d'ajustement les plus fréquemment utilisées sont les suivantes:

- ✓ Loi de Gauss ou Loi Normale;
- ✓ Loi de Galton ou Loi Log-Normale.

Dans le cadre de notre projet, nous allons recourir à une simulation des contributions annuelles à l'aide du logiciel HYFRAN

b.1 Ajustement à la loi Normale :

Également désignée sous le nom de loi Gaussienne, il s'agit d'une loi de probabilité continue caractérisée par deux paramètres: la moyenne μ et l'écart-type σ . Sa fonction de répartition se présente sous la forme suivante :

$$F(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{u^2}{2}} du \dots\dots\dots(3.8)$$

Dans le cadre de notre projet, il est essentiel de comprendre les fluctuations annuelles des précipitations sur une période de retour de 5 ans. Les résultats de l'analyse de la série de données pluviométriques de la station sont présentés dans le tableau 3.10 et 3.11 et fig 3.22 ci-après.

Tableau 3.10 : Ajustement par la loi normal.

T	q	XT	Intervalle de confiance(95%)
20.0	0.9500	67.4	52.7-82.2
10.0	0.9000	57.8	44.8-70.7
5.0	0.8000	46.1	34.9-57.2
3.0	0.6667	35.1	25.1-45.1
2.0	0.5000	23.7	14.1-33.2

Et on a :

Tableau 3.11 : les paramètres de la série.

moy	Écart type	Médiane	P max	Pmin	CV	N
23.66966667	26.59879703	12.35	92.97	0.25	1.123750385	30

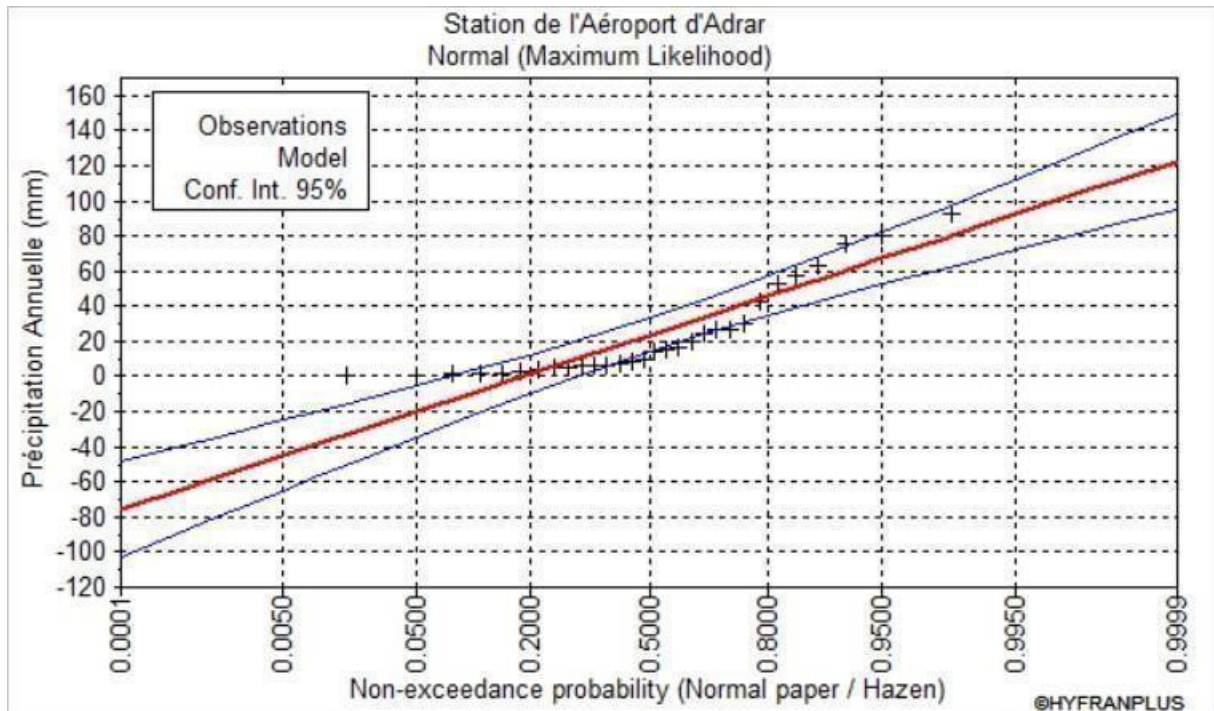


Figure 3.22: Graphe de l'ajustement par la loi normale.

b. Ajustement à la loi Log-Normale :

En probabilités et en statistique, une variable aléatoire X est considérée comme suivant une loi Log-Normale avec des paramètres μ et σ^2 si la variable $Y = \ln(X)$ obéit à une loi normale ayant pour espérance μ et variance σ^2 . Les résultats de l'analyse de la série pluviométrique de la station sont présentés dans le tableau 3.23 et la figure 3.19 ci-après.

Tableau 3.12: Ajustement par la loi log normale

T	q	XT	Intervalle de confiance(95%)
20.0	0.9500	118	23.7-212
10.0	0.9000	69.9	20.9-119
5.0	0.8000	37.1	14.7-59.4
3.0	0.6667	20.5	9.44-31.6
2.0	0.5000	11.0	5.34-16.7
1.4286	0.3000	5.18	2.33-8.04
1.2500	0.2000	3.28	1.30-5.26
1.1111	0.1000	1.74	0.520-2.96
1.0526	0.0500	1.03	0.208-1.85
1.0204	0.0200	0.572	0.0460-1.10

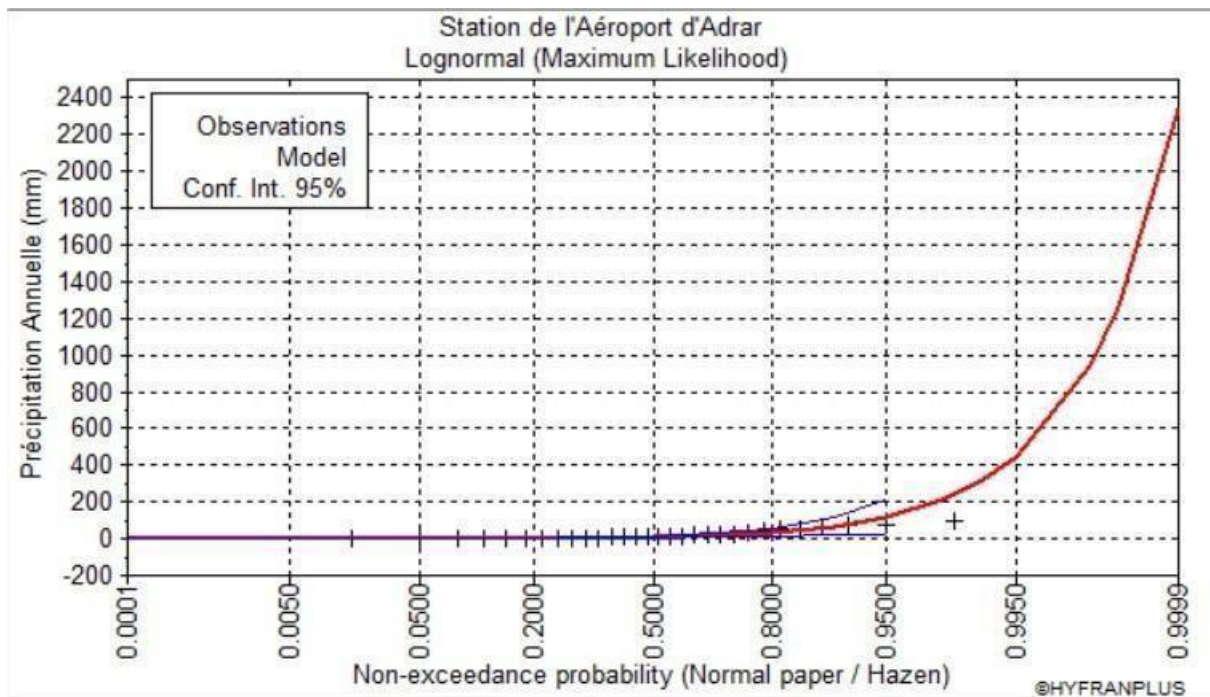


Figure 3.23: Graphique de l'ajustement par la loi Log normale.

3.7.3 Test de validité d'un ajustement :

Une fois qu'une série de données a été ajustée selon les lois de probabilités et de statistiques, il est essentiel de comparer l'adéquation de cette loi pour déterminer le meilleur ajustement. Parmi les tests les plus couramment utilisés, on trouve le test du Khi Carré χ^2 . Le logiciel HYFRAN est utilisé pour effectuer ce calcul et les résultats dans le tableau 3.13 suivant :

Tableau 3.13: la validité de l'ajustement.

Loi Normale	Loi Log-Normale
χ^2 calculé=27.8	χ^2 calculé= 2.67
Degrés de liberté=4	

L'analyse par le test de Khi Carré χ^2 indique que la loi Log-Normale est la plus appropriée, c'est pourquoi nous l'adoptons pour estimer la moyenne mensuelle des précipitations représentatives de la région.

b.1 Identification de l'année de calcul:

L'identification de l'année de calcul permet d'évaluer la quantité de précipitations accessible aux végétaux. Cette estimation se fait en considérant une fraction des pluies efficaces (pluie avec une probabilité de 80%). À cet effet, la loi suivante est appliquée :

$$P_{\text{moy 80\% de chaque mois}} = P_{\text{moy de chaque mois}} \times \frac{P_{\text{théorique 20\% annuel}}}{P_{\text{théorique 50\% annuel}}}$$

$$P_{\text{thér 20\%}} n = 3.28$$

$$P_{\text{thér 50\%}} n = 11$$

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 3.14 ci-dessous:

Tableau 3.14: pluviométrie moyenne de chaque mois.

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU
P_{moy} (mm)	2.2	2.3	1.5	0.9	0.9	1.4	2.6	4.6	17.1	3.8	3.7	0.6
P_{80% moy} (mm)	0.7	0.7	0.5	0.3	0.3	0.4	0.8	1.4	5.1	1.1	1.1	0.2

L'analyse des données révèle que la région présente un climat saharien caractérisé par une pluviométrie très faible et fluctuante au fil du temps. Les précipitations mensuelles, avec une probabilité de 80 % établies dans cette étude, sont considérablement inférieures à celles des autres facteurs climatiques, en particulier par rapport à l'évapotranspiration. Cela souligne la nécessité d'utiliser d'importantes quantités d'eau pour l'irrigation.

3.8 Caractéristiques de l'eau de la foggara :

L'eau affiche une minéralisation avec une concentration en sels minéraux de 880 mg/l, et son profil physico-chimique est décrit comme étant modérément chloré sodique comme le tableau 3.15 montre ci-après. Selon les normes d'OMS, L'eau analysée présente une qualité physicochimique moyenne. Elle est légèrement minéralisée, ce qui peut lui conférer un goût particulier. Certaines concentrations en ions dépassent légèrement les normes, mais cela ne rend pas l'eau impropre à la consommation. (**Annexe1**)

Tableau 3.15: l'analyse physico-chimique de l'eau de la foggara (Source: ANRH).

Paramétrés	Unité	Résultats			
PH	/	7.89	Mg++	mg/l	28
CE	ms/cm	2.42	Na+	mg/l	160
R.S	mg/l	1080	K+	mg/l	20
O2dissous	mg/l	/	Cl-	mg/l	240
NH4+	mg/l	0.09	SO4--	mg/l	250
NO2-	mg/l	0.02	HCO3-	mg/l	140
PO4-	mg/l	0.009	TH	°F	33
NO3-	mg/l	20	TAC	°F	12
Ca++	mg/l	87	TA	°F	0
Minéralisation	880mg/l				

3.9 La pente du terrain:

La commune de Tamentit et la foggara d'Anhil se trouvent dans une région à topographie variée. Le terrain présente généralement une pente douce à modérée, s'inclinant progressivement d'un point haut vers un point bas. Cette pente, dont la valeur est de 0,9%, joue un rôle crucial dans l'écoulement des eaux de pluie et le fonctionnement de la foggara, comme illustré dans la fig 3.24.

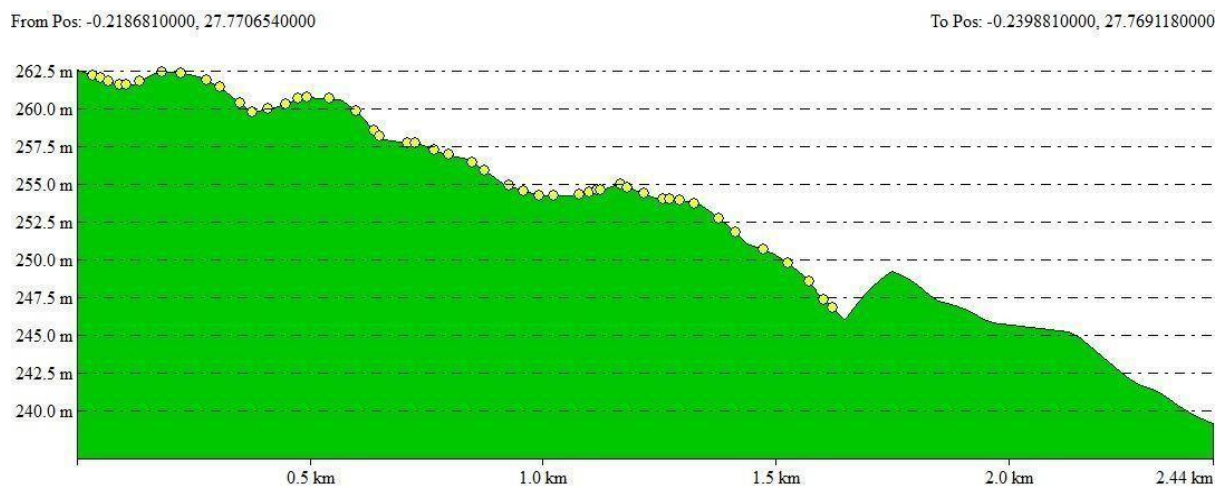


Figure 3.24: Profile topographique d'Anhil (Source : AGIRE)

3.10 Les besoins en eau :

La demande en eau d'irrigation, représente la quantité d'eau nécessaire pour garantir que la culture reçoit l'intégralité de ses besoins hydriques, ou une proportion spécifique de ceux-ci. Dans le cas où l'irrigation constitue la seule source d'approvisionnement en eau, cette demande sera au minimum équivalent aux besoins en eau de la culture comme illustre le tableau 3.16.

Tableau 3.16: Les besoins en eau de chaque culture.

Mois	Blé	Dattes	Oignon/Ail	Pomme de terre	Tomate	melon	Total (mm)
Sep	0	0	43.59	154.8	0	0	198.39
Oct	0	0	60.2	176.41	0	0	236.61
Nov	43.59	43.59	81.68	130.78	0	0	299.64
Déc	60.2	60.2	105.28	69.47	0	0	295.15
Jan	81.68	81.68	0	0	0	0	217.81
Fév	116.98	105.28	0	0	0	0	315.84
Mar	170.71	146.32	0	0	81.29	81.29	650
Avr	157.43	157.43	0	0	157.43	148.17	814.93
Mai	149.75	149.75	0	0	287.02	262.06	1073.2
Jun	86.65	86.65	0	0	210.44	259.96	643.7
Jul	0	0	0	0	0	199.92	199.92
Août	0	0	0	0	0	0	0

3.10.1 Débit caractéristique :

L'évaluation du débit caractéristique sert à établir le débit maximal que le système d'irrigation devra fournir pour chaque parcelle, ce qui est obtenu en multipliant le débit de pointe par la surface agricole utile.

$$Q_s = 8.011/s$$

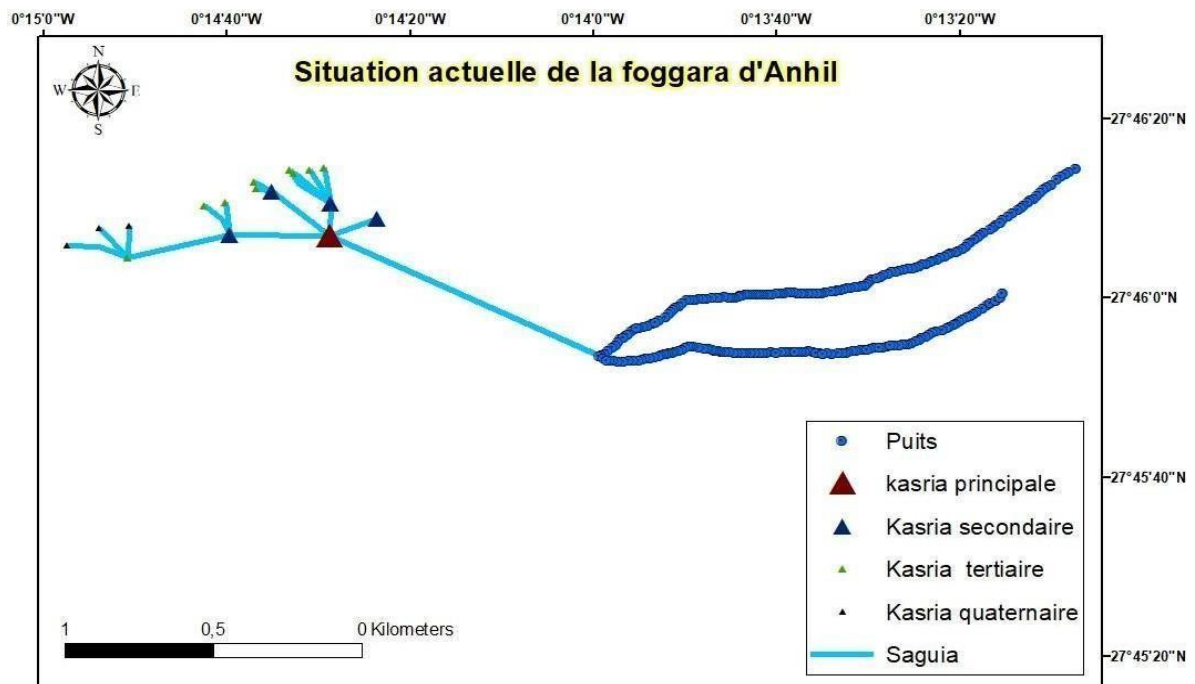
Avec : Q_s : débit spécifique (l/s/ha) .

Il est essentiel de dimensionner le réseau de la foggara en fonction de ce débit caractéristique pour prévenir le surdimensionnement, minimiser les risques et garantir l'irrigation de l'ensemble des terres agricoles de la région.

3.10.2 Plan de distribution la Foggara :

Le plan de la Foggara d'Anhil (fig 3.25) révèle un système d'irrigation souterrain complexe et étendu. On observe un réseau principal de galeries souterraines, représenté par une ligne bleue continue, qui serpente sur plusieurs kilomètres à travers le terrain. Ce réseau principal est alimenté par de nombreux puits, symbolisés par des points bleus, qui permettent de capter les eaux souterraines. Le long de ce réseau principal, on distingue plusieurs structures appelées "kasriat", représentées par différents symboles géométriques (triangles, carrés, losanges). Ces

Kasriat sont des puits verticaux qui permettent d'accéder à la galerie souterraine et de l'aérer. Leur nombre et leur distribution suggèrent un système d'entretien et de réparation bien organisé. À l'extrémité du réseau principal, on observe une "sagua", un canal ouvert qui distribue l'eau vers les zones cultivées. L'ensemble de ce dispositif, constitué de puits, de galeries et de Kasriat, forme un système ingénieux qui permet d'exploiter les ressources en eau souterraine et de les acheminer vers les zones agricoles, malgré les contraintes



topographiques du terrain.

Figure 3.25: Plan de la situation actuelle de la foggara d'Anhil (Source: AGIRE).

3.11 Généralité hydraulique :

Les équations de Barré de Saint-Venant, publiées en 1871 par A.J.C. Saint-Venant, jouent un rôle essentiel dans les domaines de l'hydraulique fluviale et maritime. Elles décrivent les écoulements à surface libre dans des conditions où la profondeur de l'eau est faible, d'où leur appellation anglaise « Shallow Water Equations ». Ces équations sont obtenues en intégrant Verticalement les équations de Reynolds, en utilisant certaines hypothèses. Les travaux de chercheurs tels que Hervouet, Thual, Tan et Ryhming ont également contribué à leur développement.

3.12 Écoulement à surface libre:

Il est défini comme un écoulement de liquide avec une surface qui est en contact avec l'air libre est la pression atmosphérique, ce cas d'écoulement se fait sous l'action de la force de gravité à cause de l'existence de la pente (Lancastre, 2010). La branche de l'hydraulique

appelée hydraulique fluviale se concentre sur l'étude des écoulements dans les canaux naturels et artificiels, où la surface de l'eau est soumise à la pression atmosphérique et peut varier en forme. Cette variation peut entraîner des changements dans la forme et les dimensions de la section transversale du liquide. Les différents types d'écoulement rencontrés en hydraulique fluviale sont:

- Écoulement permanent:

Où il y a deux cas qui sont :

- Uniforme

- Non uniforme

- Écoulement non permanent :

Où il y a deux cas qui sont :

- Uniforme

- Non uniforme.

Types d'écoulements :

Les différents types d'écoulements peuvent être caractérisés par la variation des paramètres hydrauliques tels que la profondeur de l'eau et la vitesse en fonction du temps et de l'espace (fig 3.26).

Variabilité dans le temps :

Écoulement permanent : Un écoulement est considéré comme permanent lorsque les caractéristiques telles que la vitesse, le débit et la profondeur demeurent constants en magnitude et en direction au fil du temps.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dh}{dt} = \frac{du}{dt} \dots\dots\dots (3.9)$$

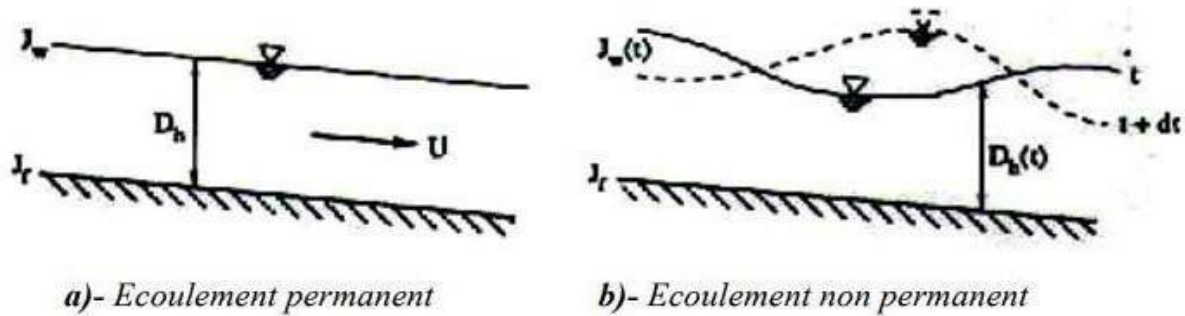
Il se divise en :

- ✓ Uniforme.

- ✓ Non uniforme.

Écoulement non permanent: Il est affirmé qu'un écoulement est considéré comme non permanent lorsque les caractéristiques telles que la vitesse, le débit et la profondeur varient en magnitude et en direction au fil du temps.

$$\frac{dv}{dt} \neq \frac{dQ}{dt} \neq \frac{dh}{dt} \neq \frac{du}{dt} \dots\dots\dots(3.10)$$



3.26: Écoulement suivant le temps (TOUMI, 2016).

Variation spatiale :

Écoulement uniforme :

Un écoulement est considéré comme uniforme lorsque les flux de liquide se déplacent en lignes droites, de manière parallèle les uns aux autres et parallèles aux parois. En d'autres termes, on qualifie un écoulement d'uniforme lorsque les paramètres qui définissent cet écoulement demeurent constants à travers les différentes sections du canal.

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dQ}{dx} = \frac{dh}{dx} = \frac{du}{dx} = 0 \dots\dots\dots(3.11)$$

Écoulement non uniforme graduellement varié :

Un régime d'écoulement caractérisé par une variation minimale de la hauteur dans la direction de l'écoulement, généralement exprimé par la relation où x représente une distance d'écoulement et h une variation de hauteur.

On a: $\Delta h / x \ll 1$.

Écoulement non uniforme rapidement varié :

Régime d'écoulement caractérisé par une variation significative de la hauteur dans la direction de l'écoulement. Lorsqu'il se rapproche d'une singularité ou en présence d'un ressaut hydraulique, l'écoulement peut rapidement passer à un régime varié.

Régime d'écoulement :

Un écoulement peut être catégorisé selon divers types d'écoulement, lesquels sont classés en fonction du nombre de Froude, prenant en considération les forces d'inertie ainsi que les forces gravitationnelles (Lancastre, 1996). Il est décrit comme le rapport entre la force gravitationnelle et les forces d'inertie :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g.Dh}} \dots\dots\dots(3.12)$$

Où : V : Vitesse moyenne de l'écoulement.

Dh: Profondeur hydraulique.

g: : Accélération gravitationnelle et sa valeur généralement est 9,81.

Lorsque :

Fr = 1 : le régime est critique (supercritique) ;

Fr < 1 : le régime est fluvial (sur critique) ;

Fr > 1 : le régime est torrentiel.

Le concept de régime fluvial, torrentiel ou critique est clairement pertinent dans le cas spécifique du régime uniforme.

Lorsque :

Yn < Yc : écoulement uniforme torrentiel.

Yn > Yc : écoulement uniforme fluvial.

Un autre paramètre sans dimension utilisé dans l'analyse hydraulique est le nombre de Reynolds, qui s'ajoute au nombre de Froude pour former trois régimes distincts. Il représente le rapport entre les forces de viscosité et les forces d'inertie.

$$Re = \frac{V \times h}{\nu} \dots\dots\dots(3.13)$$

Le nombre de Reynolds est utilisé pour classer les différents types d'écoulements :

Re < 500 : écoulement laminaire.

Re > 2000 : écoulement turbulent.

500 < Re < 2000 : écoulement de transition.

Par conséquent, l'association des deux chiffres aboutit à la classification suivante :

Fr < 1, Re < 500 : écoulement fluvial-laminaire.

Fr < 1, Re > 2000 : écoulement fluvial-turbulent.

Fr > 1, Re < 500 : écoulement torrentiel laminaire.

Fr > 1, Re > 2000 : écoulement torrentiel-turbulent.

Canaux à ciel ouvert : Un canal désigne un dispositif de transport permettant à un liquide de s'écouler, dont la surface libre est exposée à la pression atmosphérique (Graf et Altinakar, 2000).

Types de canaux :

Il existe deux types de canaux distincts :

Les canaux naturels :

Les cours d'eau naturels se réfèrent aux canaux d'eau qui se forment naturellement sur (ou sous) la surface terrestre (fig 3.27), comprenant les ruisseaux, les torrents, les rivières, les fleuves et les estuaires. En général, les caractéristiques géométriques et hydrauliques de ces canaux naturels sont souvent assez variables.

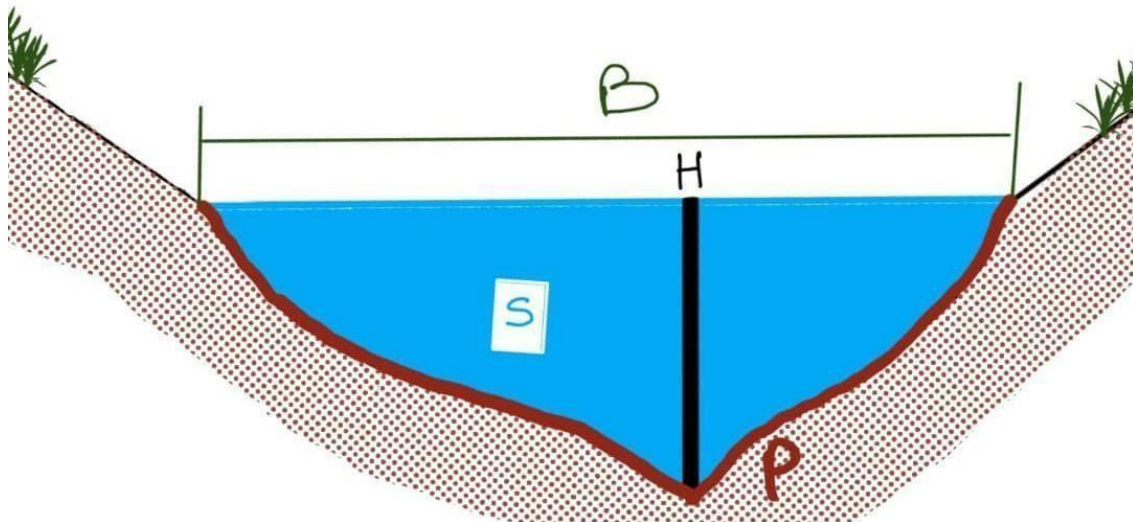


Figure 3.27: Schéma d'une canal naturel.

S : section mouillée, partie du canal délimitée par les parois et la surface de l'eau.

P : Périmètre mouillé, la longueur de la surface d'écoulement en contact avec le lit, incluant le fond et les berges, correspond au périmètre de la section d'écoulement diminué de la largeur au niveau du miroir.

B : Largeur au miroir, la largeur de la zone d'écoulement à la surface libre est déterminée par la pression du fluide, qui est équivalente à la pression atmosphérique à cette interface.

H : Tirant d'eau, la profondeur maximale d'une tranche d'écoulement.

Les canaux artificiels :

Les canaux artificiels, tels que les canaux de navigation, d'adduction, d'évacuation, d'irrigation et de drainage, sont des cours d'eau créés par l'homme. Ils peuvent être construits au niveau du sol ou être couverts, comme les tunnels hydrauliques, les aqueducs, les drains et les égouts. En général, les propriétés hydrauliques de ces canaux sont assez uniformes et l'application de la théorie hydraulique conduit souvent à des résultats satisfaisants. (Degoutte, G., 2006).

Propriétés des canaux :

a. Propriétés géométriques :

Un canal est composé des éléments géométriques définis ci-dessous (Fig 3.28) (Graf et Altinakar ,2000).

- La section transversale A.
- La section mouillée Sm.
- Le périmètre mouillé Pm
- Le rayon hydraulique Rh est le rapport de la section mouillée et du périmètre mouillé :

$$Rh = \frac{S_m}{P_m} \dots\dots\dots(3.14)$$

- La largeur en surface du canal b est la distance séparant les berges opposées ;
- La profondeur hydraulique.

$$Dh = \frac{S_m}{b} \dots\dots\dots(3.15)$$

- La pente de la surface libre Sw.
- La profondeur H (tirant d'eau).
- La pente du fond S0.

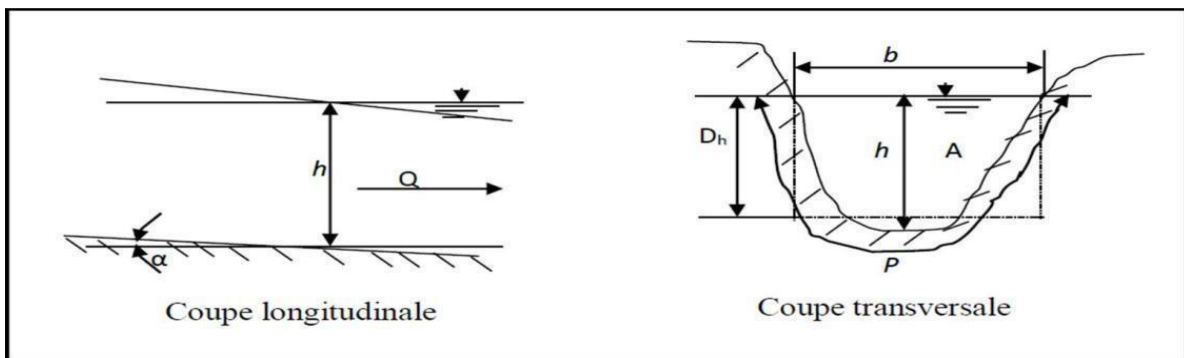


Figure 3.28: Les caractéristiques géométriques de la section. (TOUMI.A, 2016)

3.9. Propriétés hydrauliques:

3.9.1. Débits:

Le débit (Q) représente la quantité d'eau s'écoulant à travers une section perpendiculaire à l'axe du canal en une unité de temps donnée.

3.9.2. Vitesse en un point de l'écoulement :

La vitesse (V) à un point donné de l'écoulement correspond à la vitesse de la particule qui traverse ce point à l'instant considéré.

3.10. Dimensionnement:

Lorsqu'on parle de débit variable de manière progressive, cela signifie que le débit d'écoulement d'un fluide dans un système hydraulique augmente ou diminue de manière graduelle au fil du temps. Dans ce cas, il est raisonnable de supposer que la pente de la courbe

de charge reste constante dans toutes les sections du système c'est à dire un écoulement uniforme.

3.10.1. Conditions de l'écoulement uniforme:

1. Le flux d'eau dans chacune des sections des tronçons suggérés demeure uniforme.
2. La forme du canal est prismatique.
3. La profondeur h du flux est invariable sur toute sa longueur.
4. L'inclinaison de chaque section reste constante.
5. La rugosité des parois est homogène.
6. Il n'existe aucune résistance locale.

3.10.2. Formules de calcul:

La principale équation utilisée pour décrire un écoulement permanent et uniforme est celle de Chézy. La vitesse moyenne du flux peut être exprimée de la manière suivante :

3.12.1.1 Formule de Chezy:

$$V = C \times \sqrt{R \times I} \dots\dots\dots(3.16)$$

En recourant au produit suivant :

$$Q = S \times V \dots\dots\dots(3.17)$$

Les résultats obtenus sont les suivants :

$$Q = C \times S \times \sqrt{R \times I} \dots\dots\dots(3.18)$$

Avec : C : Coefficient de Chézy (m^{0.5}/s)

Rh : Rayon hydraulique étant la surface mouillée Sm sur le périmètre mouillé Pm. Rh : Sm / Pm (m)

n : Coefficient de rugosité

I : Pente de fond du canal (radier).

iii. Détermination de coefficient de Chézy :

En se basant sur les équations empiriques pour calculer le coefficient de Chézy :

3.12.1.2 Formule d'AGROSKINE :

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \times \log Rh \dots\dots\dots(3.19)$$

Avec:

C : Coefficient de Chézy (m^{0.5}/s)

R : Rayon hydraulique,

n : Coefficient de rugosité.

3.12.1.3 Formule de MANING-STRICKLER :

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \dots\dots\dots(3.20)$$

Avec:

C : Coefficient de Chézy (m0.5/s)

R h : Rayon hydraulique,

avec :

n : Coefficient de rugosité avec $1/n = K$ (coefficient de Strickler).

La formule de MANING-STRICKLER permet de convertir l'équation de Chézy afin d'obtenir:

$$V = K \times R^{2/3} \times I^{1/2} \dots\dots\dots(3.21)$$

Où : K : coefficient de rugosité de STRICKLER (m1/3/s).

R : le rayon hydraulique (m).

I : la pente du radie (km/km).

3.12.1.4 Formule de PAVLOVSKY :

$$C = \frac{1}{n} \times R^{1/y} \dots\dots\dots(3.22)$$

Avec :

C : Coefficient de Chézy (m0.5/s)

n : Rugosité. R : Rayon hydraulique.

Avec : y : l'exposant est déterminé en fonction de la relation complète :

$$y = 2.5\sqrt{n} - 0.13 - 0.75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0.10) \dots\dots\dots(3.23)$$

Ou bien à travers des égalités simplifiées :

à Rh < 1m. $R=1.5\sqrt{n}$

à Rh > 1m. $R=1.5\sqrt{n}$

e. Formule de BAZIN :

$$C = \frac{87}{1 + \frac{Mb}{\sqrt{R}}} \dots\dots\dots(3.24)$$

Mb : Coefficient de BAZIN.

Mb il est entre 0,06 et 1.75 m0, 5.

Remarque :

Qui est largement reconnue comme étant une méthode précise et fiable pour effectuer des calculs dans divers domaines, tels que l'ingénierie, la physique et les sciences de l'environnement. Cette formule prend en compte plusieurs variables et paramètres pour fournir des résultats précis et cohérents, ce qui en fait un outil essentiel pour de nombreuses applications pratiques. En utilisant la formule de MANING-STRICKLER, nous pouvons

obtenir des estimations précises pour des phénomènes tels que la vitesse d'écoulement d'un fluide dans un canal, la perte de charge dans un système de tuyauterie, ou la capacité de transport d'un cours d'eau. Ainsi, en soulignant que notre calcul repose sur cette formule, nous mettons en avant la rigueur et la fiabilité de notre approche, et nous nous assurons que nos résultats sont basés sur des principes scientifiques solides.

Afin d'évaluer le débit instantané de la foggara en amont de la kasria principale d'Aghisrou, nous avons procédé à un mesurage de la vitesse d'écoulement. Un flotteur a été introduit dans le cours d'eau sur une distance connue. Le temps mis par le flotteur pour parcourir cette distance a été chronométré, permettant ainsi de calculer la vitesse et, par extension, le débit initial du réseau.

Tableau 3.17: les valeurs des paramétrés initiale.

La pente	Coefficient de STRICKLER	La longueur totale
0.98%	$K=30m^{1/3}/s$	Environ 6,3 km

D'après les données recueillies sur le terrain, on peut en trouver que : $B=30cm$, $L=10m$, $T=28min$, $h_n=7cm$. On calcule la vitesse de la surface de l'écoulement :

$$V = \frac{L}{T} = \frac{10}{28} = 0.357 \text{ m/s} \dots \dots \dots (3.25)$$

Remarque :

Pour caractériser l'écoulement de manière précise, il est nécessaire de convertir la vitesse maximale mesurée en surface en vitesse moyenne, qui est plus représentative du débit global.

On a:

$$V_{moy} = \frac{2}{3} \times V_{max} = 0.24 \text{ m/s} \dots \dots \dots (3.36)$$

Par la suite, nous pouvons exprimer le débit à l'aide de la formule générale suivante :

$$Q = V_{moy} \times S_m \dots \dots \dots (3.27)$$

Avec : S_m : est section mouillée en m^2 .

$$S_m = B \cdot h_n = 0.021 \text{ m}^2 \dots \dots \dots (3.28)$$

Ainsi : $V_{moy} < V_{adm}$, pour un sol sable-limoneux.

$$Q = V_{moy} \times S_m = 0.005 \text{ m}^3/s = 5l/s \dots \dots \dots (3.29)$$

Les éléments essentiels pour le calcul de la ligne d'eau sont :

$L = 2550m$.

$I = 0.9\%$.

$n = 0.014$.

$B = 0.30 \text{ m}$.

3.10.3. Calcul la hauteur critique :

La relation de Manning-Strickler est utilisée pour calculer la hauteur critique h_c :

$$Q = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S\sqrt{I} \dots \dots \dots (3.30)$$

$$\text{Et } H_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 \times g}} \dots \dots \dots (3.31)$$

Avec :

h_c : hauteur critique (m)

Q : débit (m³/s),

b : largeur de la canal $b = 0.30\text{m}$.

AN : $h_c = 0.03 \text{ m}$

3.10.4. Calcul de la hauteur normale :

La hauteur normale h_n représente la hauteur de la colonne d'eau dans le canal principal, déterminée par la formule de Manning-Strickler (3.30):

Ou :

n : coefficient de Manning, $n = 0.014$

R : rayon hydraulique. i : la pente du terrain

Par application numérique :

$H_n = 0.029 \text{ m}$, $Fr = 1.067$

On a : $H_n \approx H_c$

cela veut dire : Quand la hauteur d'un écoulement atteint sa hauteur critique, cela indique que l'écoulement se trouve à un état d'équilibre instable, à la frontière entre un régime fluvial et un régime torrentiel. Une légère perturbation peut suffire à provoquer un changement de régime. Cette condition présente une complexité dans sa modélisation et requiert une vigilance accrue lors de la conception des infrastructures hydrauliques.

3.10.5. Le nombre de Reynolds (Re):

Le calcul du nombre de Reynolds dans notre cas est essentiel pour prédire le type d'écoulement que nous pouvons attendre dans le tuyau d'eau. En fonction de ce nombre, nous saurons si l'écoulement sera laminaire (couches ordonnées) ou turbulent (avec des tourbillons). Cela a des implications directes sur la performance et la conception de notre système hydraulique.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \dots \dots \dots (3.32)$$

ρ : masse volumique du fluide

V : vitesse caractéristique du fluide

L : dimension caractéristique (le diamètre d'un tuyau)

μ : viscosité dynamique du fluide.

3.10.6. Pertes de charge dans les conduites sous pression :

Le dimensionnement et l'analyse des conduites se basent sur l'évaluation des pertes de charge et l'optimisation de la charge d'écoulement. Les ingénieurs en hydraulique étudient depuis longtemps ces pertes d'énergie dans les conduites sous pression, développant plusieurs équations liées à la vitesse d'écoulement et au diamètre. L'étude des régimes d'écoulement par Reynolds a permis d'améliorer ces formules. $\Delta H_t = \Delta H_l + \Delta H_s$.

3.10.7. Pertes de charge linéaires:

$$\Delta H_l = \lambda \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g} \dots\dots\dots(3.33)$$

Avec : $\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon/D)$ Comme notre cas, le régime est Laminaire : $\lambda = 64/\text{Re}$. **3.10.8. Pertes de charge singulières:**

$$\Delta H_s = K_s \cdot \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(3.34)$$

Avec : K_s : est le coefficient de perte des charges singulières en fonction de la forme géométrique des accessoires. Dans notre cas on le prend toujours $\Delta H_s = 10\%$ des pertes linéaires. Pour garantir une dimension optimale d'un système de foggara et assurer sa durabilité, il est essentiel de stabiliser le débit d'alimentation en amont.

3.10.9. Ajustement du débit :

Les multiples ruptures et dysfonctionnements observés sur le site nuisent au bon fonctionnement du système de foggara (fig 3.29 et 3.30). Ces détériorations provoquent une réduction notable du débit dans les canalisations, des pertes d'eau par infiltration et, en conséquence, une diminution de la productivité des jardins. Parmi ces ruptures, nous faisons référence à:



Figure 3.29: 'Une canalisation fuyante.



Figure 3.30: Un regard qui fuit et est bouché en sable.

Il est à noter que si nous supprimons ces éléments de perte, nous pouvons atteindre le débit requis pour que le système fonctionne de manière adéquate, soit $Q=8.01$ l/s. Cela nous permet d'obtenir un $H_n=0.039\approx 0.04$ m, qui est supérieur à $H_c=0.03$ m, et un $Fr=0.05$, qui est inférieur à 1, ce qui indique que l'écoulement est fluvial (stable).

3.9.1. Dimensions actuelles:

Le réseau de distribution de la foggara d'Anhil est schématisé dans la figure 3.31 ci-dessus. On peut diviser le plan en plusieurs parties pour extraire les dimensions actuelles de la foggara,

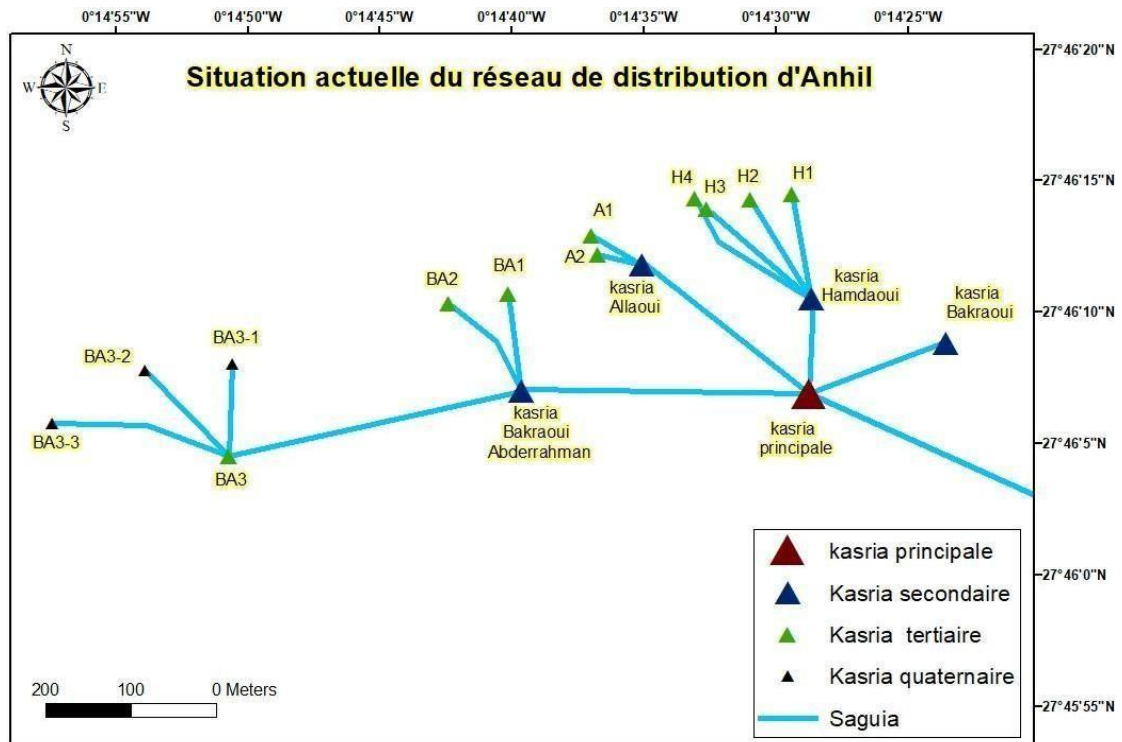


Figure 3.31: Plan de la situation actuelle du réseau de distribution d'Anhil.
(Source : AGIRE)

À l'aide de relevés effectués sur place, nous avons pu évaluer les dimensions actuelles de la foggara, que vous trouverez résumées dans les tableaux 3.18, 3.19, 3.20 ci-après :

Tableau 3.18: dimensions actuelles des Kasriat.

Kasriat	dimensions			
Kasria principale	B=1.75m	b=0.35m	L=2m	Hn=0.06
Kasria2	B=0.60m	b=0.60m	L=0.60m	Hn=0.80
Kasria3	B=0.60m	b=Ø63	L=1.40m	Hn=0.07
Kasria4	B=0.39m	b=0.12m	L=0.50m	Hn=0.10 m
Kasria5	Introuvable			
Kasria6	B=0.40m	b=Ø50	L=0.50m	Hn=0.03
Kasria7	Introuvable			
Kasria8	B=0.25m	b=Ø50	L=0.40m	Hn=0.05 m
Kasria9	B=0.135m	b=Ø50	L=0.30m	Hn=0.02 m
Kasria10	B=0.30m	b=0.03m	L=0.30m	Hn=0.05 m
Kasria11	B=0.15m	b=Ø50	L=0.35m	Hn=0.05 m
Kasria12	B=0.19m	Introuvable		
Kasria13	B=0.40m	b=Ø50	L=0.40m	Hn=0.05 m
Kasria14	B=0.70m	b=0.30m	L=0.73m	Hn=0.05 m
Kasria15	B=0.19m	b=Ø50	L=0.30m	Hn=0.05 m
Kasria16	B=0.35m	b=0.08m	L=0.44m	Hn=0.05 m
Kasria17	B=0.70m	b=0.17m	L=0.70m	Hn=0.12 m
Kasria18	B=0.60m	b=0.10m	L=0.70m	Hn=0.05 m

Tableau 3.19: les dimensions actuelles des Madjens.

Saguiat	Dimensions		
Saguaia 1	B=0.30m	H=0.37m	L=2555m
Saguaia 2	D=160Ø(pvc)		L=160m
Saguaia 3	D=160Ø(pvc)		L=115m
Saguaia 4	D=160Ø(pvc)		L=230m
Saguaia 5	D=200Ø(pvc)		L=300m
Saguaia 6	D=110Ø(pvc)		L=37m
Saguaia 7	D=110Ø(pvc)		L=65m
Saguaia 8	D=50Ø(pvc)		L=51m
Saguaia 9	D=110Ø(pvc)		L=126m
Saguaia10	D=90Ø(pvc)		L=108m
Saguaia11	D=40Ø(pvc)		L=110m
Saguaia12	D=40Ø(pvc)		L=44m
Saguaia13	D=80Ø(pvc)		L=90.5m
Saguaia14	D=80Ø(pvc)		L=35m
Saguaia15	D=80Ø(pvc)		L=17m
Saguaia16	D=80Ø(pvc)		L=20m
Saguaia17	D=80Ø(pvc)		L=22m
Saguaia18	D=80Ø(pvc)		L=20m
Saguaia19	D=80Ø(pvc)		L=100m
Saguaia20	D=80Ø(pvc)		L=5m
Saguaia21	D=80Ø(pvc)		L=48.5m
Saguaia22	D=80Ø(pvc)		L=24m
Saguaia23	D=80Ø(pvc)		L=5m
Saguaia24	D=80Ø(pvc)		L=24.5m
Saguaia25	D=80Ø(pvc)		L=67m
Saguaia26	D=80Ø(pvc)		L=13m
Saguaia27	D=80Ø(pvc)		L=119m
Saguaia28	D=50Ø(pvc)		L=127m
Saguaia29	D=50Ø(pvc)		L=16m
Saguaia30	D=50Ø(pvc)		L=59.5m
Saguaia31	D=50Ø(pvc)		L=26m
Saguaia32	D=50Ø(pvc)		L=84m
Saguaia33	D=160Ø(pvc)		L=323m
Saguaia34	D=90Ø(pvc)		L=109m

Sagua35	D=90Ø(pvc)	L=137m
Sagua36	D=90Ø(pvc)	L=189m
Sagua37	D=50Ø(pvc)	L=85m
Sagua38	D=50Ø(pvc)	L=70.5m
Sagua39	D=50Ø(pvc)	L=41m
Sagua40	D=50Ø(pvc)	L=14.5m
Sagua41	D=50Ø(pvc)	L=37.5m
Sagua42	D=90Ø(pvc)	L=192m
Sagua43	D=90Ø(pvc)	L=98m
Sagua44	D=90Ø(pvc)	L=78m

Tableau 3.20: les dimensions actuelles des Madjens.

Madjens	Dimensions	
Madjen 1	3.70mx 9.60m	Hn=0.12m
Madjen 2	3.30m x 14.30m	Hn=0.20m
Madjen 3	4.65mx 7.25m	Hn=0.17m
Madjen 4	4mx 8m	Hn=0.05m
Madjen 5	12mx 4m	Hn=0.05
Madjen 6	2.50mx 5m	Hn=0.045m
Madjen 7	5.80mx 2.90m	Hn=0.17m
Madjen 8	2.8mx 3.10m	Hn=0.14m
Madjen 9	4mx 8m	Hn=0.04m
Madjen 10	10.55mx 2.45m	Hn=0.22m
Madjen 11	6.60mx 3.50m	Hn=0.10m
Madjen 12	4mx 8m	0.04m
Madjen 13	3mx 6m	Hn=0.28m
Madjen 14	6mx 3m	Hn=0.06m
Madjen 15	6mx 3m	Hn=0.04m
Madjen 16	3mx 8m	Hn=0.05m
Madjen 17	3mx 6m	Hn=0.07m
Madjen 18	4mx 8m	Hn=0.01m
Madjen 19	2.5mx 5m	Hn=0.01m
Madjen 20	3.15mx 7.5m	Hn=0.05m
Madjen 21	3.5mx 6m	Hn=0.01m
Madjen 22	4mx 7.5m	Hn=0.01m
Madjen 23	3mx 7m	Hn=0.01m
Madjen 24	4mx 6m	Hn=0.01m
Madjen 25	4.5mx 5.5m	Hn=0.01m
Madjen 26	3mx 6m	Hn=0.01m

3.9. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons fourni une synthèse approfondie de l'hydraulique de la foggara, un système d'irrigation traditionnel qui joue un rôle crucial dans la gestion de l'eau dans les régions arides. Nous avons abordé divers éléments relatifs à sa répartition, en mettant en lumière les différentes composantes qui contribuent à son efficacité. Cela inclut une analyse des techniques de calcul utilisées pour modéliser le flux d'eau à travers le système, ainsi que les instruments employés pour mesurer et surveiller les paramètres hydrauliques.

Nous avons également examiné les conditions environnementales qui impactent le fonctionnement de la foggara. Parmi ces conditions, l'hydrologie est un facteur clé, et nous avons effectué un ajustement des données pluviométriques pour mieux comprendre les variations saisonnières et leur influence sur le débit d'eau disponible. La qualité de l'eau est un autre aspect essentiel que nous avons pris en compte, car elle peut affecter non seulement la santé des cultures, mais aussi la durabilité du système d'irrigation lui-même.

De plus, nous avons évalué le débit circulant dans le système de la foggara, en vérifiant sa constance au fil du temps. Cette évaluation est cruciale pour garantir que les besoins en eau des parcelles soient satisfaits de manière adéquate. Nous avons ajusté les prélèvements d'eau en fonction des besoins spécifiques des cultures, en tenant compte des périodes de croissance et des exigences hydriques des différentes espèces cultivées.

Enfin, nous avons présenté les dimensions réelles de la foggara, relevées sur le terrain, dans des tableaux détaillés. Ces données fournissent une base solide pour une compréhension plus précise de la structure et de l'efficacité du système, permettant ainsi d'identifier d'éventuelles améliorations ou adaptations nécessaires pour optimiser son fonctionnement. En somme, ce chapitre offre une vue d'ensemble complète et intégrée de l'hydraulique de la foggara, en reliant théorie et pratique pour mieux appréhender les défis et les opportunités liés à cette méthode d'irrigation ancestrale.

CHAPITRE 4:

ÉTUDEDES VARIANTS.

Introduction:

Ce chapitre vise à optimiser la réhabilitation d'une foggara. En s'appuyant sur un modèle conceptuel et des données techniques, nous déterminerons la configuration idéale du réseau pour répondre aux besoins en eau tout en assurant sa durabilité. L'objectif est de restaurer ce système ancestral d'irrigation souterraine, garant d'une agriculture locale durable.

4.1. Le choix de l'aménagement:

La sélection de la variante la plus optimale sera effectuée avant de procéder à un dimensionnement précis du système. Cette décision sera fondée sur une analyse multicritère qui tiendra compte d'aspects techniques, économiques et environnementaux.

Les hypothèses de dimensionnement: Selon notre hypothèse, tous les Madjens sont alimentés par une quantité d'eau égale. Dans le cadre de cette étude, nous considérons un écoulement idéal. On fixe le H_n et le B afin de déterminer autres dimensions. Les variantes à considérer sont : L'ensemble du réseau sera refait en utilisant le ciment. L'ensemble du réseau sera refait en utilisant des tuyaux. L'ensemble du réseau sera refait en utilisant l'argile.

4.1.1. Étude du variante1:

Cette option implique l'utilisation d'un réseau en béton. Le béton, en tant que matériau composite, présente une résistance mécanique remarquable ainsi qu'une longévité significative dans des conditions environnementales difficiles, l'étude technique est les avantages et les inconvénients suivants :

a. Avantages:

Durabilité: Le béton est un matériau reconnu pour sa résistance aux agressions extérieures (abrasion, corrosion) et sa longévité, ce qui assure une durée de vie plus longue au réseau.

Étanchéité: Le béton peut être facilement rendu étanche, réduisant ainsi les pertes en eau par infiltration et améliorant l'efficacité du système.

Résistance mécanique: Le béton offre une excellente résistance aux charges, ce qui permet de construire des ouvrages solides et durables.

Flexibilité de mise en œuvre: Le béton peut être coulé sur place, ce qui permet de s'adapter

A la topographie et aux contraintes du terrain.

Disponibilité des matériaux: Le ciment et les granulats sont des matériaux largement disponibles et peu coûteux dans de nombreuses régions

i. Inconvénients:

Coût initial élevé: La réalisation d'un réseau en béton nécessite un investissement initial important, notamment en termes de matériel et de main-d'œuvre.

Temps de séchage: Le béton nécessite un temps de séchage important avant de pouvoir être mis en service, ce qui peut allonger la durée des travaux.

Impact environnemental: La production de ciment est une industrie énergivore et émettrice de CO₂, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'environnement.

Rigidité: La rigidité du béton peut le rendre vulnérable aux mouvements du sol, notamment en cas de séismes ou de tassements différentiels.

Difficulté de réparation: Les réparations sur un ouvrage en béton peuvent être complexes et coûteuses, en particulier en cas de fissures profondes ou de dégradations importantes.

Il est important de noter que le choix du béton pour la réalisation d'un réseau de foggara doit être fait au cas par cas, en pesant soigneusement les avantages et les inconvénients en fonction des contraintes spécifiques du projet.

L'étude économique est l'étude des prix de constructions et les matériaux:

a. Estimation du volume de terrassement:

Largeur de la base de la tranchée :

La largeur de la tranchée dépend du diamètre de la conduite et est déterminée en ajoutant un espacement de 30 cm de chaque côté de celle-ci. La largeur d'ouverture de la tranchée se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$B = d + 2 \times 0.3$$

En utilisant: B: la largeur de la tranchée(m) et d: le diamètre de la conduite(m).

La profondeur de la tranchée:

La profondeur de la tranchée doit être soigneusement ajustée pour garantir non seulement l'exécution adéquate des raccordements spécifiques, mais aussi pour prévenir toute interférence avec d'autres conduites qui pourraient se trouver à proximité. En effet, une profondeur inappropriée pourrait entraîner des complications lors de l'installation, rendant difficile l'accès aux points de raccordement et augmentant le risque de dommages aux infrastructures existantes. Il est donc essentiel de prendre en compte les spécificités des raccordements à réaliser, ainsi que la Configuration des autres conduites, qu'elles soient

électriques, hydrauliques ou de tout autre type. Une planification minutieuse et une évaluation précise des besoins permettront d'assurer une installation sécurisée et efficace (fig 4.1), tout en minimisant les perturbations potentielles sur le réseau existant.

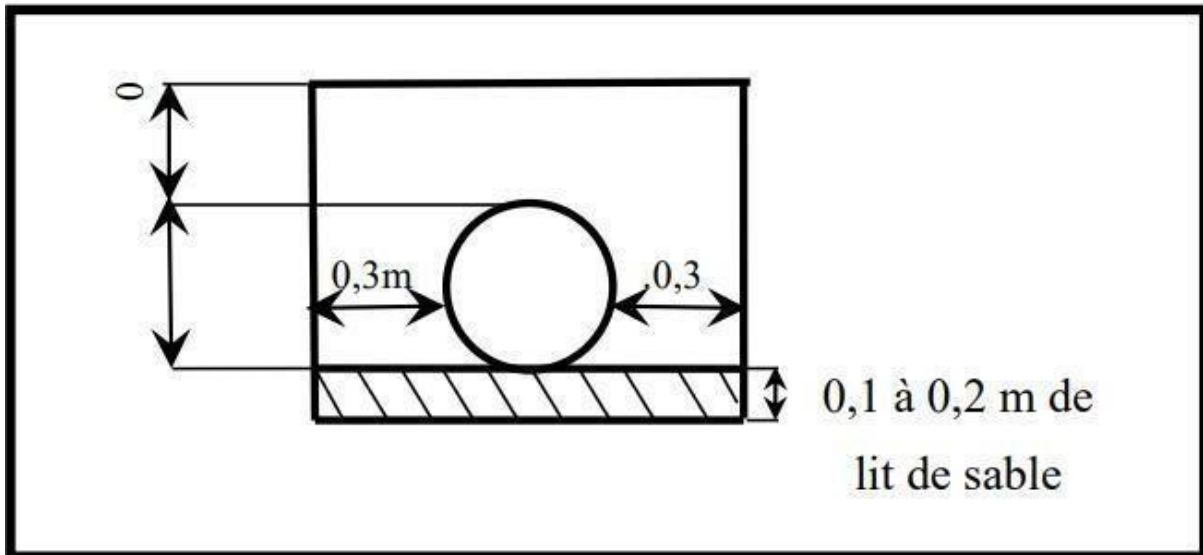


Figure 4.1 : Schéma de la tranchée.

Ensuite on a :

$$H_{tr} = e + d + h \dots \dots \dots (4.2)$$

H_{tr} : Profondeur de la tranchée (m)

e : hauteur du lit de pose (m)

d : diamètre de la conduite (m)

Les différentes sections des tranchées :

$$Str = B \times H_{tr} \dots \dots \dots (4.3)$$

H_{tr} : Profondeur totale de la tranchée (m)

B : Largeur de la base de la tranchée (m).

Volume à déblayer (excavation) :

Le volume à excaver est :

$$V_d = Str \times L = (B \times H_{tr}) \times L \dots \dots \dots (4.4)$$

V_d : Volume de déblai (m³)

Str : Section de la tranchée (m²)

L : Longueur de la tranchée (m)

B : Largeur de la tranchée (m).

Htr : Hauteur de la tranchée (m)

Volume occupé par les canalisations :

$$V_{cond} = (D_{ext} \times L) \dots\dots\dots(4.5)$$

V_{cond} : Volume du déblai (m³).

D_{ext} : Diamètre extérieur de la conduite(m).

L : Longueur de la tranchée (m).

Volume du lit de sable :

Il se calcule de la manière suivante :

$$V_s = H_s \times L \times B \dots\dots\dots(4.6)$$

V_s : Volume du lit de sable(m³).

H_s : Épaisseur de la couche de végétation (en considérant $H_{cv}=0,1$ m) (m).

L : Dimension de la tranchée (m).

B : Largeur de la tranchée (m).

Volume de remblais :

Le volume de remblai sera équivalent à :

$$V_r = V_d \cdot (\dots\dots\dots)(4.7)$$

Volume du remblai excédentaire :

$$V_{ex} = V_f \times V_r \dots\dots\dots(4.8)$$

V_{ex} : Volume de terre excédentaire (m³).

V_f : Volume de terre foisonné (m³).

V_r : Volume de remblaiement (m³).

$$\text{Où : } V_f = V_d \times K_f \dots\dots\dots(4.10)$$

Et K_f : le coefficient de foisonnement est fonction de la nature du sol, avec une valeur de k_f

Égale à 1,2. (Annexe 1)

Évaluation des coûts des travaux :

Lors de l'évaluation des coûts associés aux travaux (tableau 4.1, 4.2, 4.3), il est essentiel de prendre en compte les dépenses liées aux opérations de terrassement, incluant les déblais et remblais, ainsi que les coûts des matériaux tels que le lit de sable, et le tarif de coffrage et construction en béton. Les frais de terrassement se calculent de la manière suivante :

- Le coût pour un mètre cube de déblai est fixé à 300 DA.
- Le coût pour un mètre cube de remblai est de 310 DA.
- Le tarif pour un mètre cube de sable est de 3000 DA.
- Le prix pour un mètre cube de déblai excédentaire est de 230 DA.
- Le prix pour un mètre cube de bétonnage est de 40000 DA.

Tableau 4.1: les dimensions des volumes des Kasriat en ciment.

Kasriat	Q (m ³ /s)	Hn(m)	L(m)	B(m)	B(m)	P(m)	V(m ³)	Prix (DA)
Kasria1	0.00801	0.2	2.5	0.3	0.27	5.57	0.6127	27571.5
Kasria2	0.0006	0.2	0.3	0.1	0.02	0.72	0.00792	356.4
Kasria3	0.0018	0.2	0.7	0.2	0.14	1.74	0.01914	861.3
Kasria4	0.0015	0.2	0.6	0.2	0.14	1.54	0.01694	762.3
Kasria5	0.0059	0.2	1	0.2	0.15	2.35	0.02585	1163.25
Kasria6	0.0009	0.2	0.4	0.15	0.07	1.02	0.01122	504.9
Kasria7	x	x	x	x	x	x	x	0
Kasria8	0.0009	0.2	0.4	0.15	0.07	1.02	0.01122	504.9
Kasria9	0.0006	0.2	0.3	0.1	0.02	0.72	0.00792	356.4
Kasria10	0.0012	0.2	0.6	0.2	0.14	1.54	0.01694	762.3
Kasria11	0.000915	0.2	0.4	0.15	0.07	1.02	0.01122	504.9
Kasria12	0.0006	0.2	0.3	0.1	0.02	0.72	0.00792	356.4
Kasria13	0.0006	0.2	0.3	0.1	0.02	0.72	0.00792	356.4
Kasria14	0.0006	0.2	0.3	0.1	0.02	0.72	0.00792	356.4
Kasria15	0.000305	0.2	0.2	0.05	0.08	0.53	0.00583	262.35
Kasria16	0.0006	0.2	0.3	0.1	0.02	0.72	0.00792	356.4
Kasria17	0.000915	0.2	0.4	0.15	0.07	1.02	0.01122	504.9
Kasria18	0.0027	0.2	0.8	0.2	0.15	1.95	0.02145	965.25
								3650625

Tableau 4.2: les dimensions des tronçons en béton.

Saguiat	Q(m ³ /s)	D(m)	Vitesse(m/s)	Volume(m ³)	Pertes dc	Prix (DA)
Sagua1	0.03464049	0.062823529	0.55139356	288.1804956	0.001359504	11527219.82
Sagua2	0.00071017	0.004705882	0.150911056	4.939159252	0.018149383	197566.3701
Sagua3	0.00369015	0.014117647	0.261385616	6.148816242	0.006049794	245952.6497
Sagua4	0.002807192	0.011764706	0.23861133	11.22615119	0.007259753	449046.0477
Sagua5	0.021898444	0.04627451	0.473229094	29.04053962	0.0018457	1161621.585
Sagua6	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.814346183	0.035703704	32573.84732
Sagua7	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.430608159	0.035703704	57224.32638
Sagua8	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.122477171	0.035703704	44899.08685
Sagua9	0.000257386	0.002392157	0.107595808	2.773178894	0.035703704	110927.1557
Sagua 10	0.000257386	0.002392157	0.107595808	2.37701048	0.035703704	95080.41921
Sagua 11	0.001304665	0.007058824	0.184827541	4.15883185	0.012099589	166353.274
Sagua 13	0.001304665	0.007058824	0.184827541	3.421584385	0.012099589	136863.3754
Sagua 14	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.77032747	0.035703704	30813.09882
Sagua 15	0.00071017	0.004705882	0.150911056	0.524785671	0.018149383	20991.42682
Sagua 16	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.440187126	0.035703704	17607.48504
Sagua 17	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.484205839	0.035703704	19368.23354
Sagua 18	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.440187126	0.035703704	17607.48504
Sagua 19	0.002008663	0.009411765	0.213420462	4.365641251	0.009074691	174625.65
Sagua 20	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.110046781	0.012099589	4401.87126
Sagua 21	0.001304665	0.007058824	0.184827541	1.83366677	0.035703704	73346.6708
Sagua 22	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.528224551	0.018149383	21128.98205
Sagua 23	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.110046781	0.035703704	4401.87126

Saguaia 24	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.539229229	0.035703704	21569.16917
Saguaia 25	0.003092539	0.01254902	0.246436722	3.377475563	0.035703704	135099.0225
Saguaia 26	0.003092539	0.01254902	0.246436722	0.655331079	0.009074691	26213.24317
Saguaia 27	0.006779238	0.021176471	0.320130692	7.792669632	0.035703704	311706.7853
Saguaia 28	0.000257386	0.002392157	0.107595808	2.79518825	0.012099589	111807.53
Saguaia 29	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.352149701	0.035703704	14085.98803
Saguaia 30	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.3095567	0.035703704	52382.26799
Saguaia 31	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.572243264	0.035703704	22889.73055
Saguaia 32	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.848785929	0.006806019	73951.43717
Saguaia 33	0.000257386	0.002392157	0.107595808	7.109022085	0.006806019	284360.8834
Saguaia 34	0.000727998	0.004784314	0.152163451	3.392726389	0.004033196	135709.0556
Saguaia 35	0.001337417	0.007176471	0.186361406	5.222621299	0.035703704	208904.852
Saguaia 36	0.000727998	0.004784314	0.152163451	5.882800804	0.035703704	235312.0321
Saguaia 37	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.870795285	0.035703704	74831.81142
Saguaia 38	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.551659619	0.035703704	62066.38476
Saguaia 39	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.902383608	0.035703704	36095.34433
Saguaia 40	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.319135666	0.035703704	12765.42665
Saguaia 41	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.825350861	0.017851852	33014.03445
Saguaia 42	0.000257386	0.002392157	0.107595808	4.225796409	0.011901235	169031.8564
Saguaia 43	0.000257386	27.6013296	0.107595808	2.156916917	0.017851852	86276.67669
Saguaia 44	0.000257386	27.6013296	0.107595808	1.716729791	0.035703704	68669.19165
					16786363.46	

Tableau 4.3: les dimensions des Madjn en béton.

Madjens	Hn (m)	L (m)	B (m)	V (m ³)	Coût (DA)
Madjen1	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen2	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen3	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen4	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen5	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen6	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen7	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen8	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen9	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen10	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen11	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen12	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen13	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen14	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen15	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen16	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen17	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen18	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen19	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen20	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen21	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen22	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen23	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen24	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen25	0.3	7	4.5	1.855	83475
Madjen26	0.3	7	4.5	1.855	83475
				48.23	2170350

Tableau 4.4: Évaluation des dépenses liées aux travaux de terrassement de variante 1.

Type des travaux	unité	Prix unit	Quantité	Prix des Trav
Déblai	M3	4500	5262.316	2104926.4
P.sable	M3	5000	505.557	2527785
Remblais	M3	450	4197.46105	1888857.473
Excédentaire	M3	3500	1696.33287	508899.861
Bétonnage	M3	40000	5000	18957882.65
Total HT				14368704580
TVA19%				2730053870
TOTAL TTC				11638650709

Le montant global des travaux de terrassement et la construction est estimé à : **Cent quarante-trois millions huit cent soixante-sept mille six cent soixante-douze Dinars algérien.**

4.1. Étude du variante 2:

Cette variante préconise l'emploi exclusif de tuyauteries en PVC ou en PEHD pour la réalisation du projet, en fonction des contraintes spécifiques de chaque tronçon.

4.1.1. Avantages:

Léger et facile à manipuler: Les tuyaux en PVC et en PEHD sont légers, ce qui facilite leur transport et leur mise en œuvre sur le chantier.

Résistance à la corrosion: Ces matériaux sont résistants à la corrosion, ce qui les rend adaptés à un usage en contact avec l'eau et le sol.

Joint étanche: Les raccords utilisés pour assembler ces tuyaux assurent généralement une étanchéité parfaite, réduisant ainsi les pertes en eau.

Flexibilité: Les tuyaux en PEHD sont particulièrement flexibles, ce qui facilite leur mise en œuvre dans des terrains accidentés ou lors de la réalisation de coudes.

Rapidité de pose: La pose de ces tuyaux est généralement rapide, ce qui permet de réduire la durée des travaux.

Coût abordable: Le coût d'achat et de pose de ces matériaux est souvent inférieur à ce lui du béton.

4.1.2. Inconvénients:

Sensibilité aux UV: Les tuyaux en PVC et en PEHD peuvent se dégrader sous l'effet des rayons UV, il est donc recommandé de les protéger lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil.

Température de service limitée: La température de service de ces matériaux est limitée, ce qui peut poser problème dans certaines régions où les températures estivales sont très élevées.

Résistance mécanique moindre que le béton: Ces matériaux sont moins résistants aux chocs et aux charges que le béton, notamment en cas de passage de véhicules lourds.

Déformation sous charge: Sous l'effet de charges importantes, les tuyaux en PEHD peuvent se déformer, ce qui peut entraîner des fuites.

Risque de perforation par les racines: Les racines des arbres peuvent percer les tuyaux, notamment en PEHD, ce qui peut entraîner des fuites.

Choix entre PVC et PEHD:

PVC: Offre une bonne résistance aux produits chimiques et une bonne rigidité. Il est plus adapté aux terrains stables et aux pressions élevées.

PEHD: Très flexible, résistant aux chocs et aux basses températures. Il est particulièrement adapté aux terrains accidentés et aux longues longueurs de tuyaux. Le choix entre le PVC et le PEHD dépendra de plusieurs facteurs, tels que: La pression de service, La température du fluide La nature du sol, Le diamètre des tuyaux, Le budget disponible

Évaluation des coûts des travaux:

Les dimensions, les coûts, et les pertes des charges sont mentionnés dans les tableaux 4.5, 4.6

Le coût pour un mètre cube de déblai est fixé à 300 DA.

Le coût pour un mètre cube de remblai est de 310 DA.

Le tarif pour un mètre cube de sable est de 3000 DA.

Le prix pour un mètre cube de déblai excédentaire est de 230 DA.

Tableau 4.5 : Évaluation des dépenses liées aux travaux de terrassement de variante 2.

Typedestravaux	Unité	Prixunit	Quantité	Prix
Déblai	M3	400	5262.316	2104926.4
P.sable	M3	5000	505.557	2527785
Remblais	M3	450	4197.46105	1888857.473
Excédentaire	M3	300	1696.33287	508899.861
TotalHT				7030468.734
TVA19%				1335789.059
TOTALTTC1				5694679.674

Le montant global des travaux de terrassement est estimé à: Cinq millions six cent quatre-vingt-quatorze mille six cent soixante-neuf virgule six cent soixante-quatorze.

Tableau 4.6: Les nouvelles dimensions des Saguia et le devis estimatif.

Saguia	Débit	Diamètre	DN	PN	Prix unit	Prix	Pertes
Saguia1	0.00801	141.447847	160	6	2500	6387500	7.81346E-05
Saguia2	0.0006	38.7129002	40	4	270	43200	7.82875E-05
Saguia3	0.0018	67.0527101	80	4	780	89700	1.40673E-05
Saguia5	0.0059	121.396478	125	6	1650	495000	1.50312E-05
Saguia6	0.000305	27.6013296	32	4	260	9620	2.82875E-05
Saguia7	0.000305	27.6013296	32	4	260	16900	4.96942E-05
Saguia8	0.000305	27.6013296	32	4	260	13260	3.89908E-05
Saguia9	0.000305	27.6013296	32	4	260	32760	9.63303E-05
Saguia 10	0.000305	27.6013296	32	4	260	28080	8.25688E-05
Saguia 11	0.0009	47.4134260	50	10	330	36300	3.44465E-05
Saguia 13	0.0009	47.4134260	50	10	330	29865	2.83401E-05
Saguia 14	0.000305	27.6013296	32	4	260	9100	2.67584E-05
Saguia 15	0.0006	38.7129002	40	4	270	4590	8.31804E-06
Saguia 16	0.000305	27.6013296	32	4	260	5200	1.52905E-05
Saguia 17	0.000305	27.6013296	32	4	260	5720	1.68196E-05
Saguia 18	0.000305	27.6013296	32	4	260	5200	1.52905E-05
Saguia 19	0.0012	54.7483086	63	6	500	50000	1.97247E-05
Saguia 20	0.000305	27.6013296	32	4	260	1300	3.82263E-06
Saguia 21	0.0009	47.4134260	50	4	330	16005	1.51878E-05
Saguia 22	0.000305	27.6013296	32	4	260	6240	1.83486E-05

Saguia 23	0.000305	27.6013296	32	4	260	1300	3.82263E-06
Saguia 24	0.000305	27.6013296	32	4	260	6370	1.87309E-05
Saguia 27	0.0027	82.1224629	110	6	1150	136850	7.69935E-06
Saguia 28	0.000305	27.6013296	32	4	260	33020	9.70948E-05
Saguia 29	0.000305	27.6013296	32	4	260	4160	1.22324E-05
Saguia 30	0.000305	27.6013296	32	4	260	15470	4.54893E-05
Saguia 31	0.000305	27.6013296	32	4	260	6760	1.98777E-05
Saguia 32	0.000305	27.6013296	32	4	260	21840	6.42202E-05
Saguia 33	0.000305	27.6013296	32	4	260	83980	0.00024694
Saguia 34	0.00061	39.0341746	40	10	100	10900	5.33333E-05
Saguia 35	0.000915	47.8069052	50	10	140	19180	4.29015E-05
Saguia 36	0.00061	39.0341746	40	10	100	18900	9.24771E-05
Saguia 37	0.000305	27.6013296	32	4	260	22100	6.49847E-05
Saguia 38	0.000305	27.6013296	32	4	260	18330	5.38991E-05
Saguia 39	0.000305	27.6013296	32	4	260	10660	3.13456E-05
Saguia 40	0.000305	27.6013296	32	4	260	3770	1.10856E-05
Saguia 41	0.000305	27.6013296	32	4	260	9750	2.86697E-05
Saguia 42	0.000305	27.6013296	32	4	260	49920	0.00014678
Saguia 43	0.000305	27.6013296	32	4	260	25480	7.49235E-05
Saguia 44	0.000305	27.6013296	32	4	260	20280	5.9633E-05
Totale						7945825	0.00191714

Le coût total estimé pour cette variante s'élève à: **treize millions six cent quarante mille cinquante-quatre dinars et soixante-sept centimes dinars algérien.**

4.1. Étude du variante 3:

Cette variante envisage de réaménager le système de la foggara en intégrant la chaux, une ressource naturelle classique. Cette méthode durable repose sur l'idée que la chaux, lorsqu'elle est en contact avec l'eau, lui apporte des minéraux bénéfiques et gardent l'esthétique traditionnel de la foggara.

4.1.1. Avantages:

Avantages de la Chaux pour la Restauration des Foggaras Résistance et Durabilité :

La chaux est un matériau ancien, mais sa résistance et sa durabilité sont indéniables. Elle peut résister aux conditions difficiles des foggaras, notamment l'humidité et les variations de température.

Régulation de l'Humidité :

La chaux a la capacité d'absorber et de restituer l'humidité. Dans une foggara, cela peut aider à maintenir un équilibre hydrique optimal.

Effet antibactérien : Grâce à son pH élevé (supérieur à 12), l'enduit à la chaux empêche la croissance des moisissures et a un effet antibactérien.

Perméabilité et Respiration : La chaux permet aux murs de respirer, évitant ainsi les problèmes d'humidité emprisonnée. Cela est essentiel pour la préservation des structures anciennes.

Esthétique et Finitions : Les rendus à base de chaux offrent une esthétique authentique et peuvent être travaillés pour obtenir différentes finitions.

Matériau Naturel et Local: Utiliser la chaux pour la restauration des foggaras s'inscrit dans une démarche écologique, car c'est un matériau naturel et souvent disponible localement

4.1.2. Inconvénients:

Complexité de mise en Œuvre :

Travailler avec la chaux nécessite une expertise spécifique. Les dosages, les mélanges et les techniques d'application doivent être maîtrisés.

Temps de Séchage :

La chaux nécessite un temps de séchage plus long que certains autres matériaux. Il faut donc être patient lors de la restauration.

Remarque: Pour cette variante, nous avons choisi d'utiliser un mortier à base de chaux hydraulique naturelle NHL 5 (CaCO_3), enrichi d'un mélange de graviers de 2 à 5 mm et de 5 à 20 mm. Ce choix est justifié par les propriétés mécaniques, physiques et chimiques remarquables de la chaux NHL 5. Afin d'obtenir une pâte robuste, nous avons appliqué un

dosage de 350 à 400 kg de chaux par mètre cube de granulats (combinant tout-venant et sable grossier). L'eau a été incorporée progressivement pour atteindre la consistance souhaitée.

Évaluation des coûts des travaux:

Les dimensions, les coûts, et les pertes des charges sont mentionnés dans les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9 Le coût pour un mètre cube de déblai est fixé à 300 DA.

Le coût pour un mètre cube de remblai est de 310 DA.

Le tarif pour un mètre cube de sable est de 3000 DA.

Le prix pour un mètre cube de déblai excédentaire est de 230 DA.

Tableau 4.7 : Évaluation des dépenses liées aux travaux de terrassement de variante 3.

Type des travaux	Unité	Prix unit	Quantité	Prix
Déblai	M3	400	2631.158	11840211
P.sable	M3	5000	252.7785	1263892.5
Remblais	M3	450	2098.730525	944428.7363
Excédentaire	M3	300	848.166435	2968582.523
Total HT				8508557.379
TVA 19%				1616625.902
TOTAL TTC				6891931.477

Tableau 4.8: les dimensions des volumes des Kasriat en chaux.

Kasriat	Q(m ³ /s)	Hn(m)	L(m)	B(m)	B(m)	P(m)	V(m ³)	Prix Da
Kasria principale	0,00801	0,2	2,5	0,3	0,27	5,57	0,069625	348,125
Kasria2	0,0006	0,2	0,3	0,1	0,02	0,72	0,00792	39,6
Kasria3	0,0018	0,2	0,7	0,2	0,14	1,74	0,01914	95,7
Kasria4	0,0015	0,2	0,6	0,2	0,14	1,54	0,01694	84,7
Kasria5	0,0059	0,2	1	0,2	0,15	2,35	0,02585	129,25
Kasria6	0,0009	0,2	0,4	0,15	0,07	1,02	0,01122	56,1
Kasria8	0,0009	0,2	0,4	0,15	0,07	1,02	0,01122	56,1
Kasria9	0,0006	0,2	0,3	0,1	0,02	0,72	0,00792	39,6
Kasria10	0,0012	0,2	0,6	0,2	0,14	1,54	0,01694	84,7
Kasria11	0,000915	0,2	0,4	0,15	0,07	1,02	0,01122	56,1
Kasria12	0,0006	0,2	0,3	0,1	0,02	0,72	0,00792	39,6
Kasria13	0,0006	0,2	0,3	0,1	0,02	0,72	0,00792	39,6
Kasria14	0,0006	0,2	0,3	0,1	0,02	0,72	0,00792	39,6
Kasria15	0,000305	0,2	0,2	0,05	0,08	0,53	0,00583	29,15
Kasria16	0,0006	0,2	0,3	0,1	0,02	0,72	0,00792	39,6
Kasria17	0,000915	0,2	0,4	0,15	0,07	1,02	0,01122	56,1
Kasria18	0,0027	0,2	0,8	0,2	0,15	1,95	0,02145	107,25
							0,268175	1340,875

Tableau 4.9: les dimensions des tronçons en chaux.

Saguiat	Q (m ³ /s)	D (m)	V(m/s)	V(m ³)	Pertes charge	Prix (Da)
Sagua1	0.03464049	0.062823529	0.55139356	288.1804956	0.000543802	1,440,902,478
Sagua2	0.00071017	0.004705882	0.150911056	4.939159252	0.007259753	2,469,579,626
Sagua3	0.00369015	0.014117647	0.261385616	6.148816242	0.002419918	3,074,408,121
Sagua4	0.002807192	0.011764706	0.23861133	11.22615119	0.002903901	5,613,075,596
Sagua5	0.021898444	0.04627451	0.473229094	29.04053962	0.00073828	1,452,026,981
Sagua6	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.814346183	0.014281482	4,071,730,915
Sagua7	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.430608159	0.014281482	7,153,040,797
Sagua 8	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.122477171	0.014281482	5,612,385,856
Sagua9	0.000257386	0.002392157	0.107595808	2.773178894	0.014281482	1,386,589,447
Sagua 10	0.000257386	0.002392157	0.107595808	2.37701048	0.014281482	118,850,524
Sagua 11	0.001304665	0.007058824	0.184827541	4.15883185	0.004839835	2,079,415,925
Sagua 13	0.001304665	0.007058824	0.184827541	3.421584385	#DIV/0!	1,710,792,193
Sagua 14	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.77032747	0.004839835	3,851,637,352
Sagua 15	0.00071017	0.004705882	0.150911056	0.524785671	0.014281482	2,623,928,353
Sagua 16	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.440187126	0.007259753	220,093,563
Sagua 17	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.484205839	0.014281482	2,421,029,193
Sagua 18	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.440187126	0.014281482	220,093,563
Sagua 19	0.002008663	0.009411765	0.213420462	4.365641251	0.014281482	2,182,820,625
Sagua 20	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.110046781	0.003629877	5,502,339,075
Sagua 21	0.001304665	0.007058824	0.184827541	1.83366677	0.014281482	916,833,385
Sagua 22	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.528224551	0.004839835	2,641,122,756
Sagua 23	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.110046781	0.014281482	5,502,339,075

Sagua 24	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.539229229	0.014281482	2,696,146,147
Sagua 25	0.003092539	0.01254902	0.246436722	3.377475563	0.014281482	1,688,737,781
Sagua 26	0.003092539	0.01254902	0.246436722	0.655331079	0.002722407	3,276,655,397
Sagua 27	0.006779238	0.021176471	0.320130692	7.792669632	0.002722407	3,896,334,816
Sagua 28	0.000257386	0.002392157	0.107595808	2.79518825	0.001613278	1,397,594,125
Sagua 29	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.352149701	0.014281482	1,760,748,504
Sagua 30	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.3095567	0.014281482	6,547,783,499
Sagua 31	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.572243264	0.014281482	2,861,216,319
Sagua 32	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.848785929	0.014281482	9,243,929,646
Sagua3	0.000257386	0.002392157	0.107595808	7.109022085	0.014281482	3,554,511,042
Sagua 34	0.000727998	0.004784314	0.152163451	3.392726389	0.014281482	1,696,363,195
Sagua 35	0.001337417	0.007176471	0.186361406	5.222621299	0.007140741	261,131,065
Sagua 36	0.000727998	0.004784314	0.152163451	5.882800804	0.004760494	2,941,400,402
Sagua 37	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.870795285	0.007140741	9,353,976,427
Sagua 38	0.000257386	0.002392157	0.107595808	1.551659619	0.014281482	7,758,298,095
Sagua 39	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.902383608	0.014281482	4,511,918,041
Sagua 40	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.319135666	0.014281482	1,595,678,332
Sagua 41	0.000257386	0.002392157	0.107595808	0.825350861	0.014281482	4,126,754,306
Sagua 42	0.000257386	0.002392157	0.107595808	4.225796409	0.014281482	2,112,898,205
Sagua 43	0.000257386	27.6013296	0.107595808	2.156916917	0.014281482	1,078,458,459
Sagua 44	0.000257386	27.6013296	0.107595808	1.716729791	0.014281482	8,583,648,957

Tableau 4.10: les dimensions des Madjn en chaux.

Madjens	Hn (m)	L (m)	B (m)	V (m ³)	Coût (Da)
Madjen1	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen2	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen3	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen4	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen5	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen6	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen7	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen8	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen9	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen10	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen11	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen12	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen13	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen14	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen15	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen16	0.3	7	4.5	5.775	288.75
Madjen17	0.3	7	4.5	5.775	288.75

Le coût total estimé pour cette variante s'élève à :**Huit millions neuf cent quatre-vingt-seize mille sept cent soixante-quatre unités et huit cent cinquante-deux Dinars algérien.**

5 Résultat et discussion:

Nous avons examiné trois alternatives pour la restauration de la foggara, un système d'irrigation traditionnel qui mérite une attention particulière en raison de son importance historique et écologique. La première option que nous avons envisagée était l'utilisation de béton. Ce matériau présente des caractéristiques techniques robustes, garantissant une durabilité face aux fluctuations climatiques et à l'humidité, ce qui est essentiel pour la longévité de la structure. Cependant, malgré ses avantages indéniables en termes de résistance, le coût prohibitif du béton a conduit à son rejet. En effet, les ressources financières nécessaires pour sa mise en œuvre auraient pu compromettre d'autres aspects du projet.

La deuxième alternative, quant à elle, était l'utilisation de PVC. Ce matériau, bien que moins traditionnel, était également techniquement acceptable grâce aux propriétés inhérentes du PVC, telles que sa légèreté, sa résistance à la corrosion et sa facilité d'installation. De plus, le PVC s'est révélé être financièrement plus avantageux que le béton, ce qui en faisait une option séduisante. Cependant, malgré ces atouts, nous avons estimé que le PVC ne répondait pas entièrement à nos critères en matière d'esthétique et de durabilité à long terme.

Finalement, notre choix s'est porté sur la troisième option : la chaux. Ce matériau offre une combinaison idéale de résistance, d'écologie et d'esthétique, tout en étant économiquement viable. L'utilisation de la chaux permet non seulement de maintenir le caractère traditionnel de la foggara, mais elle assure également sa pérennité dans le temps. En effet, la chaux est un matériau naturel qui s'intègre harmonieusement dans le paysage environnant et qui favorise la durabilité écologique. Bien qu'elle requière une main-d'œuvre qualifiée pour son application, cette solution a été privilégiée pour sa cohérence et sa pertinence par rapport à nos objectifs de préservation et de valorisation du patrimoine. En optant pour la chaux, nous avons fait le choix d'une approche respectueuse de l'environnement, tout en garantissant la fonctionnalité et l'esthétique de la foggara pour les générations futures.

Conclusion:

Suite au calcul des nouvelles dimensions des structures de la foggara, nous avons entrepris une analyse comparative approfondie des différentes options disponibles. Cette analyse a impliqué l'évaluation minutieuse de chaque alternative en termes de performance technique, de durabilité, de facilité d'entretien et de coût économique.

Nous avons examiné les avantages et les inconvénients de chaque option, en tenant compte des spécificités du terrain, des matériaux disponibles et des exigences réglementaires. Après avoir pesé ces facteurs, nous avons sélectionné l'option qui offrait le meilleur équilibre entre une performance technique optimale et un coût économique raisonnable. Cette décision a été guidée par notre engagement à garantir l'efficacité et la viabilité à long terme des structures de la foggara, tout en respectant les contraintes budgétaires et en maximisant les ressources disponibles.

En fin de compte, notre choix s'est porté sur une solution qui non seulement répond aux besoins immédiats du projet, mais qui est également durable et adaptable aux évolutions futures. Cette approche nous permettra de garantir la pérennité des infrastructures tout en assurant un bon rapport qualité-prix.

Chapitre 5:

ORGANISATION DE CHANTIER.

Introduction:

L'organisation d'un chantier est l'ensemble des dispositions envisagées pour l'exécution dans les meilleures conditions possible d'un travail pour abaisser les coûts de production en favorisant à l'homme et à la machine un contexte favorable de façon à accroître la productivité. Une identification précise du site de construction facilite grandement l'élaboration d'un calendrier technologique pour les équipements et améliore leur utilisation lors des différentes tâches. Cela permet de s'adapter aux limitations d'espace et de temps dictées par le marché. Par conséquent, une organisation efficace du chantier joue un rôle essentiel dans la diminution des coûts de l'ouvrage, prévenant ainsi qu'il ne devienne trop coûteux. Ces projets engendrent d'importants défis, mais pour y faire face, peu importe les obstacles rencontrés, il est essentiel de posséder une compréhension précise de l'organisation du chantier. Pour réaliser ces objectifs, il est nécessaire de:

Établir clairement les méthodes d'exécution et les procédures opérationnelles qui permettront d'appliquer efficacement les techniques modernes de construction avec un rendement optimal. Organiser et coordonner les tâches en faisant appel à une main-d'œuvre spécialisée. Aménager de manière appropriée les postes de travail stabilisés, en intégrant une mécanisation de plus en plus avancée. Déterminer avec précision le personnel à recruter, car le coût de la main-d'œuvre a un impact significatif sur le prix de revient.

5.1. Fonctions et attributions des acteurs sur le chantier:

Avant d'aborder en détail le chantier de construction d'un ouvrage, il est essentiel de rappeler les fonctions des divers intervenants impliqués dans le processus de construction.

Lemaître d'ouvrage:

Il s'agit d'une entité, qu'elle soit une personne physique ou morale, pour laquelle les travaux sont réalisés. Sa fonction consiste à établir les objectifs à atteindre (programme), à organiser le financement, ainsi qu'à conclure et à régler les contrats de travaux. Une fois les ouvrages réceptionnés, il en devient le propriétaire et, dans certains cas, le gestionnaire.

Le maître d'œuvre:

Il s'agit d'une entité, qu'elle soit physique ou morale, désignée par le maître d'ouvrage pour réceptionner l'ouvrage, élaborer le dossier de consultation des entreprises, assister le maître d'ouvrage lors de l'analyse des offres, superviser l'exécution des travaux et proposer leur paiement, après avoir établi le décompte. Dans le cadre d'un ouvrage, le maître d'œuvre a également pour mission d'interpréter son oscillation jusqu'à la fin de la phase de mise en eau et de gérer le rapport de la première mise en eau.

L'entrepreneur:

Il est une entité, qu'elle soit une personne physique ou morale, qui détient un contrat de travaux avec le maître d'ouvrage (fig5.1). Il est chargé de réaliser les travaux et, dans certains cas, de concevoir les détails des ouvrages. Sa responsabilité s'étend au chantier et à l'ouvrage en construction jusqu'à leur réception. La relation contractuelle entre les différents acteurs d'un chantier peut être représentée par un schéma.

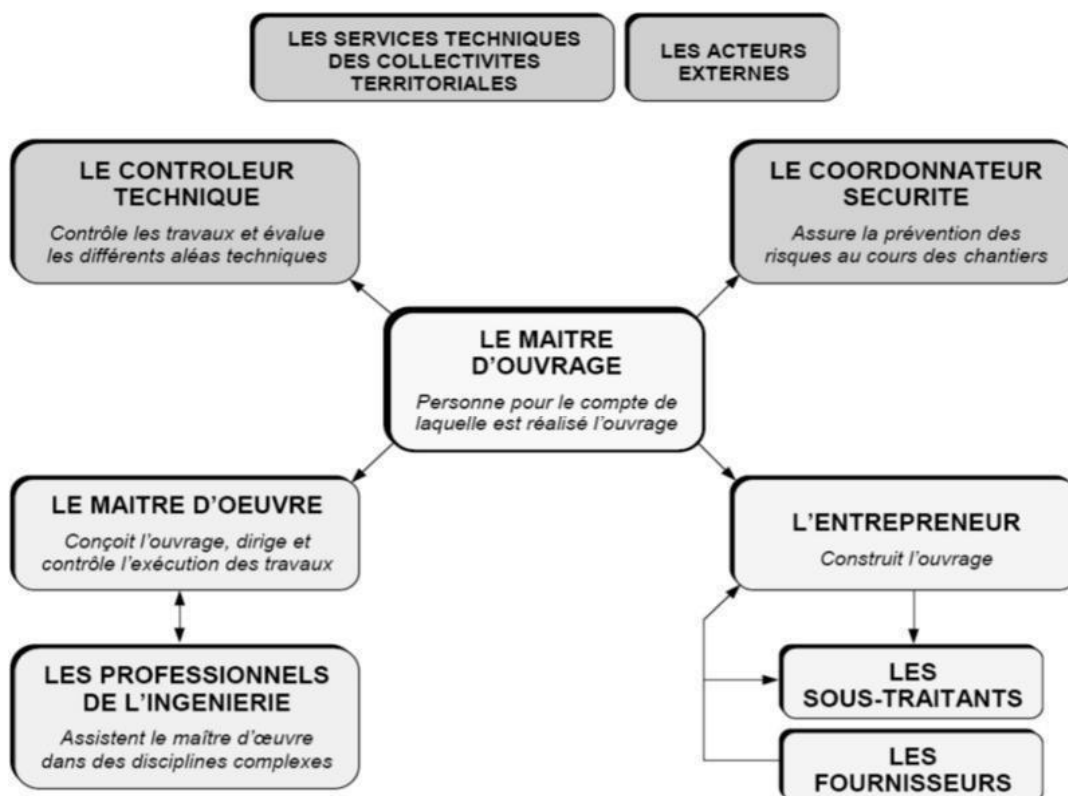


Figure 5.1: Relation entre les personnes du chantier.

5.2. Installations du chantier:

5.2.1. Installations destinées au personnel:

Ce sont généralement les dortoirs, vestiaires, réfectoires, installations sanitaires et les bureaux de chantier.

5.2.2. Installations pour le stockage des matériaux:

a. Les agrégats:

Les agrégats utilisés pour la production de béton, tels que le sable et les graviers, doivent faire l'objet d'un contrôle à leur arrivée. Il est essentiel de vérifier la granulométrie en effectuant des prélèvements d'échantillons. Les divers types de sables et de graviers seront entreposés en tas mélangés. Étant donné que leurs densités varient, un tel mélange pourrait altérer les mesures de poids. La méthode de stockage adoptée sera en étoile, et il est essentiel de vérifier la teneur en eau des agrégats avant leur utilisation, car le taux d'humidité de l'air peut fluctuer, tout comme les précipitations éventuelles.

b. Le Ciment et les aciers:

Le ciment sera fourni en vrac et entreposé dans des silos. À son arrivée, il est essentiel d'effectuer un contrôle de la température ainsi que diverses analyses en laboratoire (résistance, temps de prise, et aciers). Il convient de les protéger dans des zones à forte humidité (baraquements, hangars, etc.).

c. L'eau utilisée pour le gâchage:

L'eau utilisée du béton doit répondre aux normes internationales en matière de:

Matières organiques: 0.1 (g/l).

Matières en suspension: 0.2 (g/l).

Sels dissout: 1.5 (g/l).

Sulfates: 1.0 (g/l).

Acide humique: 0.05 (g/l).

Acide sulfhydrique: 0.05 (g/l).

Chlorures: 0.1 (g/l).

Ces composants indésirables peuvent entraîner des prises erronées, altérer le ciment ou corrompre les aciers.

d. Le béton:

Le béton est un matériau synthétique largement utilisé dans les travaux publics et le bétonnage en général. Pour les applications requises, le béton doit présenter une résistance à la compression de 180 bars après 28 jours. Sa composition inclut du sable, des graviers, un liant hydraulique (tel que le ciment ou d'autres) et de l'eau.

e. L'énergie électrique:

L'approvisionnement en énergie électrique sera assuré par un groupe électrogène, sans justifier l'alimentation provenant d'un réseau de moyenne tension (SONELGAZ).

f. L'alimentation en eau potable:

L'approvisionnement en eau potable sera garanti par un réservoir de stockage, dont le volume sera renouvelé chaque jour.

g. La fourniture de carburant:

La distribution sera effectuée par des camions-citernes, tandis que le stockage se fera dans des réservoirs souterrains équipés d'un système de pompage.

5.2.3. Les installations pour la réparation des équipements:

Les réparations majeures ne s'effectuent généralement pas sur le site de travail. Il est donc essentiel de disposer d'un atelier adéquatement équipé pour garantir l'entretien régulier et les réparations d'urgence des divers matériels.

5.2.4. Les installations dédiées à la préfabrication:

Les installations se composent généralement de grands espaces de type hangar, équipés des outils et machines indispensables à la fabrication des composants de construction, tels que les poutres, les dalles, les conduits et les murets.

5.1. Les moyens de chantier:

5.1.1. Les moyens humains:

Concernant les ressources humaines nécessaires à l'exécution du projet, il est impératif de justifier l'engagement de personnel qualifié pour la conduite des études préliminaires ainsi que pour la phase de construction, en précisant leurs diplômes et leurs domaines d'expertise.

5.1.2. Les équipements matériels:

Il est possible de différencier le matériel général de terrassement, celui associé à la nature du barrage, ainsi que le matériel spécifique. Pour l'ensemble des équipements, il convient de préciser les marques, les types, les puissances, les rendements, ainsi que le nombre d'engins mobilisés sur le chantier, en tenant compte de leur mode d'intervention en fonction du phasage des travaux.

5.1.1. Les équipements de terrassement:

Les équipements de terrassement englobent les machines classiques utilisées pour la création des fouilles de fondation du barrage, ainsi que pour l'extraction, le transport des matériaux et l'exécution des travaux de finition tels que le remblaiement et l'enrochement. Pelle mécanique. Chargeur à pneu ou à chenilles. Niveleuse et les camions.

5.2. Travaux de terrassement au sein des zones de construction:

5.2.1. Exécution des voies d'accès:

La zone se compose de deux chemins : le premier conduit à la carrière, tandis que le second mène au site des matériaux fins. Ces chemins sont non revêtus.

5.1.1. Identification des équipements requis:

Pour la réalisation des voies d'accès, il est essentiel de disposer d'un chargeur provenant de la carrière d'alluvions, dont le rendement est le suivant :

$$R = \frac{60 \times G \times K_r \times K_t}{T \times K_f} \dots\dots\dots(5.1)$$

Avec:

G: volume du godet (m³/h).

K_r: coefficient de remplissage de godet.

K_t: coefficient d'utilisation du temps de l'engin.

T : durée d'un cycle.

K_f: coefficient de foisonnement.

Le transport de ces matériaux nécessite l'utilisation de camions-bennes, dont l'efficacité est:

$$R_c = \frac{60 \times G \times K_t}{T} \dots\dots\dots(5.2)$$

Avec:

G: capacité de la benne du camion (m³/h).

K_t: coefficient d'utilisation du temps de l'engin.

T : durée d'un cycle.

Il convient de noter qu'avant de réaliser les voies d'accès, il est essentiel de les préparer à l'aide d'un bulldozer ayant un rendement élevé.

5.2.5. Dérivation provisoire:

Il est impératif, d'une part, de sécuriser le site de construction et de garantir le bon fonctionnement du système sans entraver le progrès des travaux. D'autre part, il est

essentiel que les structures de dérivation soient réalisées de manière rapide et aisée, afin de minimiser la durée totale de la construction. La mise en œuvre de ce projet se divise en deux phases :

Creusement du sol afin de rediriger l'eau de son parcours d'origine vers un autre temporaire. Réalisation du coffrage et du coulage du béton dans la galerie.

5.1.1. Réalisation des travaux de bétonnage:

Les travaux de bétonnage constituent un aspect crucial dans la construction de la dérivation, car la majorité des infrastructures requièrent une quantité de béton. Il est donc essentiel de déterminer sa composition en fonction de son utilisation et de l'importance de l'ouvrage prévu, tout en respectant les spécifications fournies par le concepteur.

5.1.2. Réalisation des tranchées:

Il s'agit d'une opération de terrassement qui varie en fonction des caractéristiques du sol. L'excavation sera effectuée à l'aide d'une pelle mécanique. La profondeur minimale requise pour la tranchée est de 1 mètre, tandis que sa largeur doit permettre à un homme de travailler aisément, Augmentant en fonction des diamètres des conduites à installer. L'excavation des tranchées se fait par sections successives.

5.2.6. Installation du lit de sable:

Le lit de pose a pour objectif principal d'assurer une distribution homogène des charges sur la surface d'appui. Il est donc essentiel de disposer les tuyaux de manière à éviter tout appui linéaire ou ponctuel. Avant d'installer les conduites, les étapes suivantes doivent être réalisées :

Enlever les grosses pierres présentes sur les pentes de la tranchée;

Respecter les dimensions du profil longitudinal;

Niveler soigneusement le fond de la tranchée;

Préparer le fond de la fouille en créant un lit de pose en sable. Dans notre situation, l'épaisseur requise est de 20 cm.

5.2.7. Vérification du compactage des tranchées:

Le compactage de la zone d'enrobage et de remblai a un impact direct sur la répartition des charges autour du tuyau, ce qui affecte sa stabilité. Il est essentiel d'évaluer la qualité de cette opération. Un contrôle efficace peut être effectué à l'aide d'un outil économique (tableau 5.1), pratique et rapide à utiliser, connu sous le nom de « Sonde battue ». Cet appareil offre les avantages suivants:

Une estimation relativement précise de la densité du sol;

La détection rapide des anomalies de compactage dans une tranchée.

Tableau 5.1: Les équipements employés pour l'installation des canalisations et leurs fonctions

Nom de l'engin	Rôle de l'engin
Un chargeur	Transférer les matériaux excédentaires dans les camions.
Une pelle mécanique	Retirer les déblais et, si cela est faisable, les charger directement dans le camion, puis établir le lit de sable et procéder au remblaiement.
Un compacteur à rouleau	Compresser la couche de sable de 20 cm.
Un camion à benne	Éliminer les déchets de déblai.
Sonde battue	Surveiller le degré de compactage des fossés.
Une dame sauteuse	Le compactage du remblai autour de la conduite est essentiel. Pour garantir un soutien adéquat.
Une bétonnière	Sert à malaxer les différents constituants du mortier (Ciment ou chaux, sable, eau) ou du béton.

5.1. Planification:

La planification implique une recherche continue de l'utilisation optimale et économique de la main-d'œuvre ainsi que des autres ressources nécessaires à la mise en œuvre, afin de garantir l'efficacité des actions à réaliser. Elle se compose de :

Mise en place des postes de travail.

Évaluations en temps réel.

Étude des activités.

Mesure du temps.

Établissement des objectifs et des responsabilités. Optimisation des procédés.

Normalisation des postes de travail.

5.3. Phases de la planification:

La planification constitue le processus qui guide l'exécution des tâches à accomplir, et elle se compose des étapes suivantes :

Rassemblement des données : la création d'une synthèse analytique des informations obtenues par le biais d'études comparatives facilite l'application adéquate du plan d'exécution de notre projet.

Fragmentation du projet : le projet sera divisé en différentes tâches, chacune se voyant attribuer un responsable, les ressources nécessaires et une durée d'exécution en fonction

du rythme de travail de chaque machine.

Interactions entre les tâches : deux types de relations sont fondamentales entre les tâches durant l'exécution ; l'une concerne un enchaînement logique, tandis que l'autre se rapporte à un enchaînement préférentiel.

Sélection de la méthode de calcul : le choix de la méthode de calcul dépend principalement de la nature de l'ouvrage à réaliser. Dans notre situation, où les opérations s'enchaînent, il est conseillé d'opter pour la méthode C.P.M.

5.1. Plannings des travaux :

Il y a trois catégories de plans de travail:

Planification anticipée:

L'ensemble des opérations débute à la date la plus précoce possible. L'entreprise privilégie ce type de planification lorsqu'elle dispose de ressources abondantes et gère plusieurs projets simultanément.

Plan de travail à respecter impérativement :

Toutes les opérations doivent débiter à la date prévue sans aucun retard ; les tâches ne doivent pas être différées. L'entreprise choisit ce type de planification lorsque ses ressources sont restreintes, ce qui est plus économique.

Plan de travail intermédiaire:

Les activités débutent à une date intermédiaire, située entre la date la plus précoce et la date la plus tardive. L'entreprise choisit ce type de planification lorsqu'elle dispose de ressources suffisantes et se concentre sur un seul projet (ressources optimales).

5.4. Identification des équipements requis:

4.9.1. Stratégies de planification:

On distingue principalement deux approches de planification, à savoir:

Approches fondées sur le réseau.

Approches fondées sur le graphique.

4.9.2. Méthodes des réseaux:

Le réseau constitue une illustration graphique d'un projet, permettant de montrer les liens entre les diverses opérations qui peuvent être successives, simultanées ou convergentes, essentielles à l'atteinte des objectifs de planification. On identifie deux catégories de réseaux.

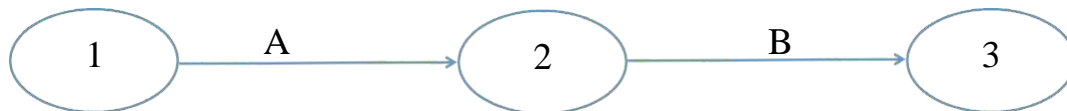
a. Réseau de nœuds:

Chaque opération est symbolisée par un nœud, tandis que les relations entre les opérations sont illustrées par des flèches. L'opération (B) ne peut débuter qu'après l'achèvement total de l'opération (A).



b. Réseau à flèches:

Chaque opération est symbolisée par une flèche, tandis que les nœuds illustrent la séquence des opérations. L'opération A se déroule avant l'opération B.



Établissement du réseau:

Pour mettre en place un réseau, il est nécessaire de réaliser les trois actions suivantes:

Élaboration d'un répertoire des activités :

Cette étape initiale consiste à effectuer un recensement minutieux et exhaustif de toutes les actions nécessaires à l'accomplissement d'un projet.

Identification des tâches préalables:

Une fois la liste des tâches à réaliser établie, il peut s'avérer complexe de créer un réseau, car il est difficile de déterminer si les tâches antérieures doivent s'exécuter de manière séquentielle ou simultanée.

Élaboration des graphes partiels.

Agrégation des graphes partiels.

Identification des tâches de début et de fin du projet.

Création du réseau.

5.4.1. Méthode graphique:

a. Méthode du chemin critique (Critical Path Method /CPM) :

Cette approche vise à optimiser les délais de réalisation d'un projet en prenant en considération trois étapes clés :

Première étape: déterminer le nombre de personnes requis pour réaliser la tâche envisagée.

Deuxième étape: examiner le réseau de manière systématique, chaque heure et quotidien.

Troisième étape: ajuster le réseau en fonction des conditions ou des contraintes établies par l'entreprise.

Méthode de calcul du C.P.M :

Les éléments essentiels de la méthode C.P.M:

Les éléments nécessaires à l'application de cette méthode sont présentés à travers une grille composée de 06 cellules.

DCP	TR
DFP	DCPP
DFPP	MT

TR: temps de réalisation;

DCP : date de commencement au plus tôt ;

DCPP: date de commencement au plus tard;

DFP : date de finition au plus tôt ;

DFPP: date de finition au plus tard;

MT : marge totale.

Où: $DFP = DCP + TR \dots\dots\dots(5.3)$

ET $DCPP=DFPP-TR$

Chemin critique C.C:

Il s'agit du parcours qui détermine la durée totale du projet (DTR) en reliant les activités ayant une marge totale nulle. Pour identifier un chemin critique, il suffit de vérifier la condition suivante :

$$\begin{cases} MT = 0 \\ \sum TR_{cc} = DTP \end{cases}$$

Durée de la construction et calendrier des travaux:

Le calendrier de construction de l'ouvrage est établi en prenant en considération la durée nécessaire pour l'exécution de chaque étape (tableau 5.2), tout en reconnaissant que certaines tâches peuvent être réalisées simultanément. Pour garantir la réussite de ces travaux, il est essentiel d'assurer une planification rigoureuse des différentes activités, afin d'optimiser l'efficacité de l'entreprise tout en respectant certaines exigences

-L'organisation du travail doit suivre un ordre approprié, garantissant une séquence

efficace des tâches ;

Il est essentiel de respecter les délais impartis pour chaque étape;

Il convient d'exécuter les tâches de manière à optimiser les coûts.

Par conséquent, cette optimisation des travaux dépend de plusieurs facteurs, notamment la mécanisation avancée des tâches, la disponibilité d'équipements de construction performants opérés par du personnel qualifié, l'état satisfaisant du réseau routier utilisé pour les opérations de transport, ainsi que la coordination temporelle de divers travaux sur plusieurs fronts sans compromettre leur exécution efficace.

Tableau 1 **Tableau 5.2: signification des opérations et leurs durées.**

L'opération	Signification	Durée d'exécution (jours)
Implantation du chantier et l'accès	A	15
Installation du dérivation provisoire	B	20
Pompages de l'eau de la Foggara dans la Dérivation	C	3
Les travaux de terrassements et Excavations	D	22
Déplacer les remblais vers le point de Rejets	E	17
Contrôle technique (topographe, qualité)	F	10
Pose du lit de sable	G	15
Fabrication de béton sur le site	H	10
Réalisation du radier	I	19
Les travaux de ferrailage	J	16
Les travaux de bétonnages	K	25
La couverture des déblais	L	5
Le compactage	M	13
Réalisation de divers travaux définitions.	N	11
Mise a l'état initiale	O	7

Conclusion:

Ce chapitre détaille les étapes nécessaires à la réalisation des travaux, en soulignant les techniques et ressources humaines et matérielles indispensables. Il commence par décrire les étapes clés du processus de construction : planification, préparation du site, exécution des travaux, et finalisation. Chaque étape doit être soigneusement gérée pour respecter délais, budget et normes de qualité. Les techniques de construction, y compris les méthodes, outils, équipements et normes de sécurité, doivent être clairement définies. L'utilisation de techniques modernes peut améliorer la productivité et la qualité. Les ressources humaines sont également cruciales. Il est important de préciser les postes nécessaires, tels que chefs de projet, ouvriers spécialisés et ingénieurs, ainsi que l'importance de la formation et de la coordination pour une communication efficace. Concernant les ressources matérielles, il faut énumérer les matériaux et équipements nécessaires, en soulignant l'importance d'une gestion rigoureuse pour éviter retards et surcoûts. Enfin, la structuration du chantier est essentielle, impliquant l'organisation de l'espace de travail, les zones de stockage et les circuits de circulation.

Chapitre 6 :

LA COMPLEXITE DE LA REHABILITATION DES FOGGARAS

6.1. Introduction

Le présent chapitre est de grande importance pour la survie et le maintien des foggaras. Avec le conflit entre la foggara et les techniques modernes de captage des eaux (forage), la foggara s'est dégradée durant ce dernier demi-siècle et plusieurs foggaras ont été abandonnés au détriment du forage. Aujourd'hui il devient difficile de creuser de nouvelles foggaras, cependant, cependant il devient indispensable de sauvegarder et de protéger les foggaras en exploitation. Mais il est intéressant de souligner que plusieurs foggaras sont dans un état très dégradé. La réhabilitation de ces foggaras devient une priorité pour les services hydrauliques et culturels pour sauver ce patrimoine unique au monde. Ce chapitre évoque la complexité des opérations de réhabilitation des foggaras.

6.2. Réhabiliter une foggara est beaucoup plus compliqué qu'un autre ouvrage hydraulique

6. 2.1. Quelques originalités d'une foggara Algérienne

Réhabiliter une foggara a l'heure actuelle devient de l'utopie. Tout simplement le système foggara se compose de l'ouvrage lui-même qui est la foggara et la partie sociale qui se compose du Kial El ma et tous les personnages qui l'entourent. Ce qui peut se réaliser aujourd'hui pour au moins assurer le service de ces foggaras est de mener des opérations de réhabilitations dans l'art et la manière. Pour atteindre notre objectif nous définissons d'abord le système foggara. Ce dernier se compose de deux parties ; la première est représentée par l'ouvrage hydraulique qui est la foggara. La deuxième partie est constituée du mesureur de l'eau appelé Kial El Ma et son entourage. Ce dernier se compose du Hassab, lequel exécute les calculs et enregistrent toutes les transactions lors d'une opération d'hygrométrie dans un registre. La présence de deux témoins est obligatoire lors d'une opération de mesure du débit. L'appareil de mesure ou le débitmètre appelé Chegfa qui accompagne toujours le Kial El Ma. Évidemment ces oasis ont inventé leurs propres unités de mesure représentées par la Habba Zrig. La foggara est considérée comme l'un des plus grands ouvrages hydraulique ancestral de la planète. Il se compose deux grandes parties (fig. 6.1 et 6.2):

- Le captage et transport des eaux
- La distribution et le partage des eaux

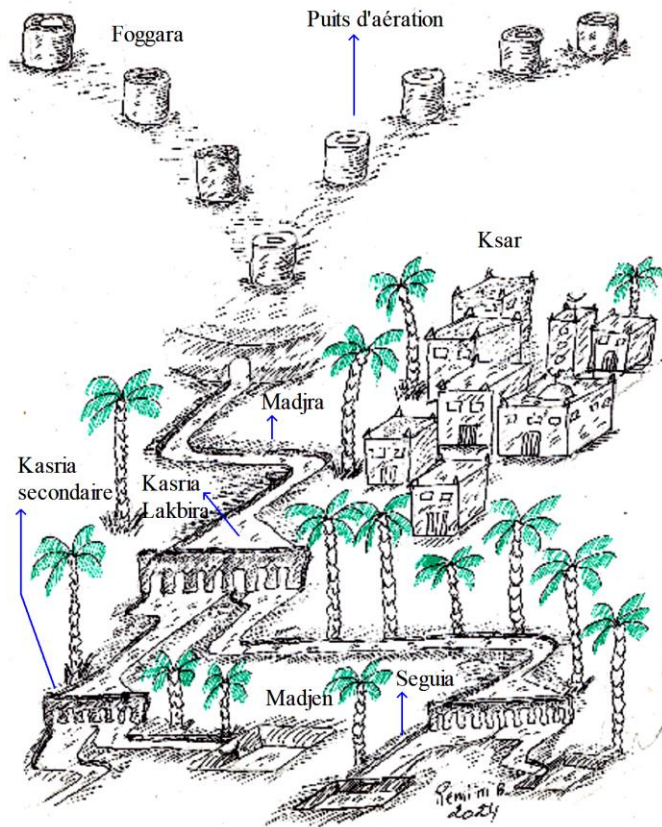


Figure 6.1 : Schéma d'une foggara Algérienne dans les oasis de Touat

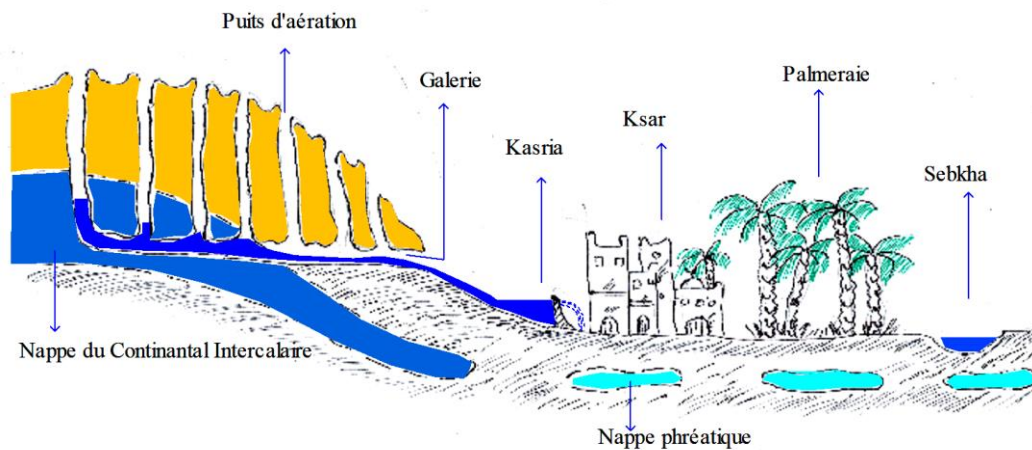


Figure 6.2 : Schéma d'une coupe longitudinale d'une foggara Algérienne

La partie captage et transport est constituée d'un puits horizontal légèrement inclinée destiné à capter les eaux souterraines qui seront ensuite transportées vers la surface du sol et les jardins qui se trouvent en contre bas. Cependant l'opération de creusement de la galerie nécessite un aménagement des puits verticaux le long du drain. Le rôle de ces puits est de permettre l'évacuation des déblais de terre, l'aération et la pénétration de la

lumière dans les profondeurs.

Ce puits horizontal se compose de deux parties principales :

- La partie captage des eaux souterraines
- La partie transport d'eau

Cet ouvrage qui nécessite beaucoup de temps est l'œuvre d'un groupe d'individus. Il est impossible d'exécuter une telle mission à titre individuel. Une fois l'eau souterraine devienne une eau de surface, ce bien oh combien il est cher devient la propriété du groupe. Dans ce cas, le partage de cette eau devient la seule et unique solution. Cependant, des lois coutumières ont été instaurées pour que chaque individu obtient la part d'eau qu'il mérite. Il est intéressant de souligner que la foggara assure en priorité l'alimentation en eau potable de toute la population ksourienne, tandis que l'irrigation des jardins s'effectue en fonction de la contribution de chaque copropriétaire. Ce sont des lois qui sont instaurées au niveau de l'oasis depuis plusieurs siècles. Ceci veut dire tout simplement que celui qui ne contribue pas au creusement ou au nettoyage de la foggara aura de l'eau pour les besoins domestiques, mais il n'a pas le droit d'irriguer son jardin. De préférence, on utilise le terme système foggara au lieu le terme foggara parce que dans ce système en plus de l'ouvrage hydraulique lui-même il existe un réseau de distribution, le Kial El Ma et le Hassab. Le Kail El Ma est accompagné de deux témoins et Hassab. En plus, ces oasisiens ont inventé leur propre débitmètre (Chegfa) ainsi que leurs propres unités (Habba). L'ouvrage hydraulique du système foggara se compose de deux parties :

- Partie 1 ; Captage et transport
- Partie 2 : Distribution et partage

Dans la première partie qui elle-même se divise en deux parties : le captage de l'eau de la nappe et le transport de cette eau vers la sortie et vers les jardins qui se trouvent en contrebas. Dans la première est la plus importante du système foggara puisque c'est elle qui détermine la quantité et la qualité de l'eau de la foggara. D'après la figure 2, la galerie de la foggara améliore la quantité et la qualité de l'eau. En ce qui concerne l'accroissement du débit réside dans l'allongement du tronçon de la galerie quantité (amont).

Appelée Tarha, pour augmenter le débit de la foggara en creusant la galerie vers l'amont (une rallonge) ou on ajoute une galerie auxiliaire (sous forme d'une branche) à la galerie mère appelée Kraa. Cette technique consiste à augmenter la surface de drainage et par conséquent le débit de la foggara (fig. 6.3).

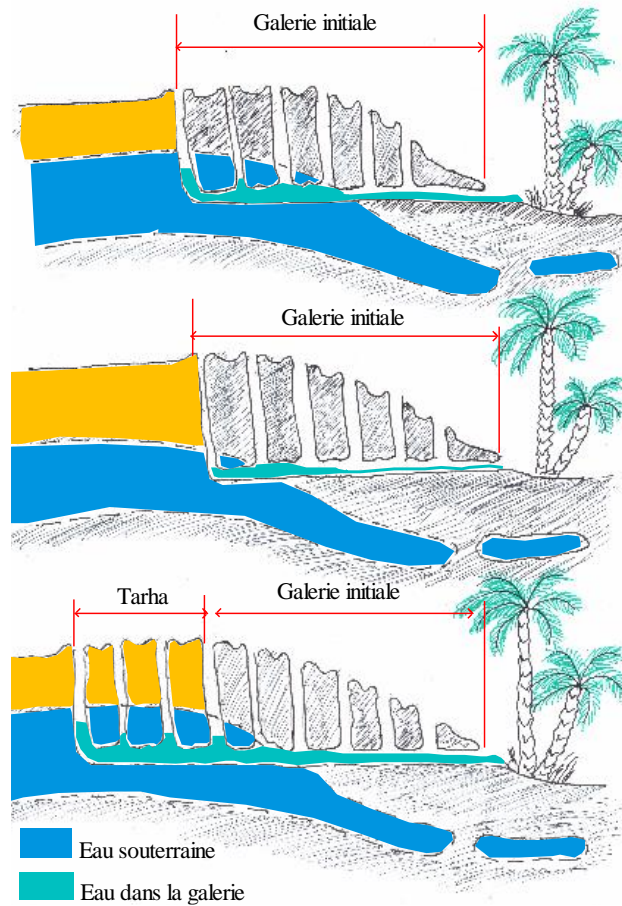


Figure 6.3 : Schéma d'une technique d'augmentation du débit d'une foggara

Dans la deuxième partie de la galerie qui est destinée au transport, elle assure la qualité d'eau. En plus, l'eau de la foggara est une eau des aquifères souterrains, cette eau avant d'atteindre son réservoir. Elle s'infiltré dans les profondeurs du sol en allant de la surface du sol jusqu'au réservoir. Tout au long de cette profondeur l'eau s'écoule avec un régime laminaire et a tout son temps de drainer avec elle les sels minéraux de différentes roches. Ensuite une fois dans l'aquifère l'eau s'écoule dans la galerie de transport et elle a le temps de parcourir toute une distance de 1 à 20 km de long avec une vitesse faible ne dépassant 1 m/s. Ceci permet à l'eau d'épouser plusieurs types de roches et par conséquent l'eau aura le temps de s'acquérir d'autres sels minéraux. On peut dire que l'eau fait son auto traitement dans ce tronçon de la galerie (fig. 6.4).

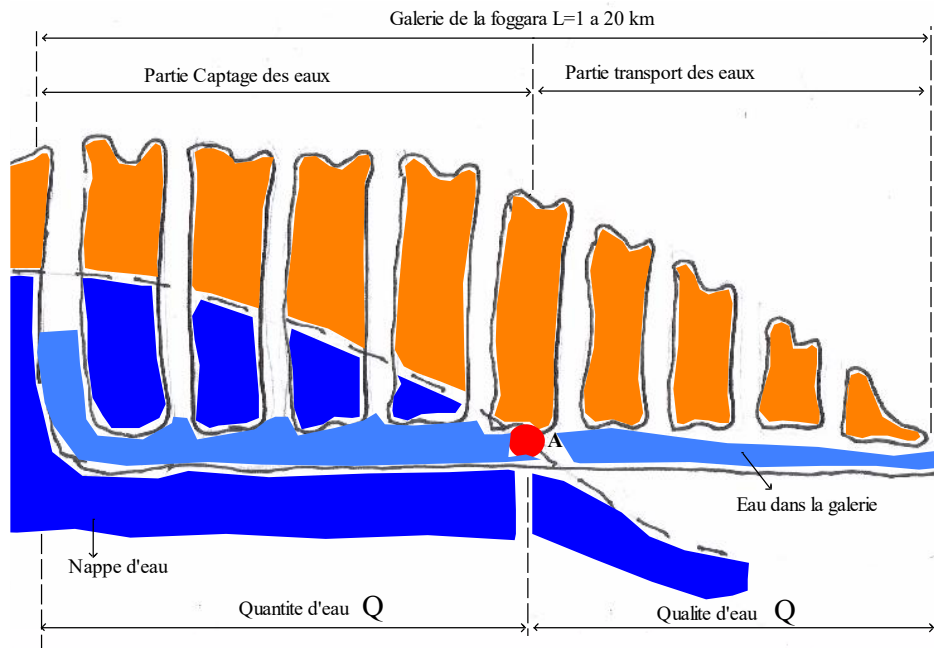


Figure 6.4 : Diagramme de Q2 d'une foggara

A la sortie de la galerie, l'eau de très bonne qualité s'achemine directement la kasria Lakbira (fig. 6.5). C'est l'endroit de partage de l'eau entre les copropriétaires. C'est la deuxième partie de la foggara qui est représentée par le réseau de distribution. Différents types de réseau existant à savoir les réseaux maillé et ramifié, les oasisiens ont inventé leur propre réseau, on parle du réseau triangulaire. Chaque paysan reçoit sa part d'eau d'une façon continue pour remplir le madjen durant 24 heures.



Figure 6.5 : Schéma d'une Kasria Lakbira

Un système durable, la foggara est le seul système hydraulique qui fonctionne avec zéro

énergie et assure la durabilité sans endommager l'environnement, puisqu'elle fonctionne depuis plus de 25 siècles. Aujourd'hui ce système foggara est menacé de disparaître pour plusieurs problèmes, le plus important est le conflit entre le forage et la foggara. La foggara est agressée par le forage puisque des forages ont été forés dans le champ de captage des foggaras (fig. 6.6(a et b)). Plusieurs cas ont été signalés dans la région d'Adrar et de Timimoun. Ce qui a engendré automatiquement la dégradation et l'abandon de plusieurs foggaras.

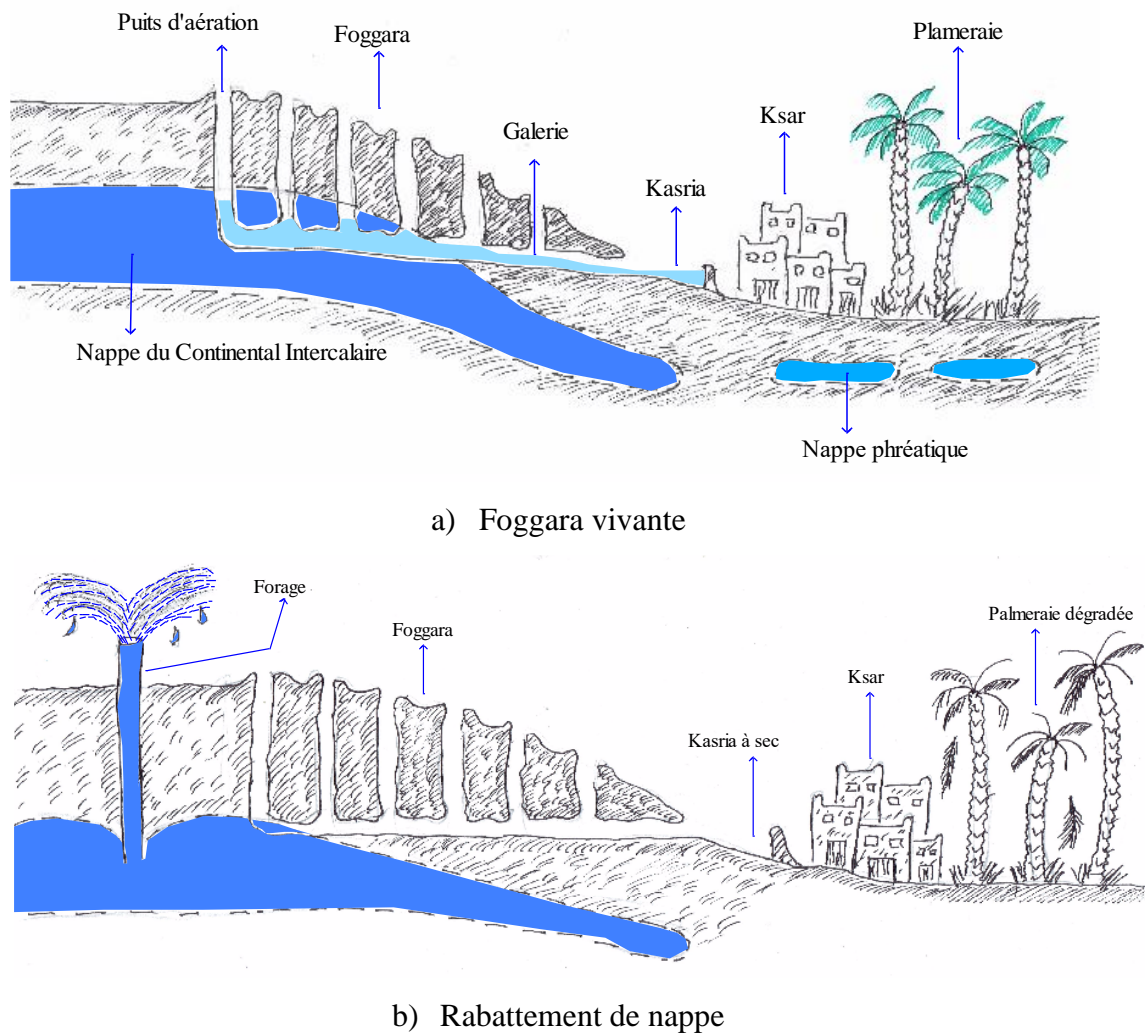


Figure 6.6 : Assèchement de la foggara suite à l'introduction des forages dans son de captage

6.2.2. Cas de la foggara d'Anhil

Ses origines remontent avant le 10^{ème} siècle, la foggara Anhil est une petite foggara d'une longueur de 2 km de galerie équipée de 300 puits d'aération est située dans la région d'Adrar (fig. 6.7, 6.8 et 6.9). Elle draine un débit de 4,5 l/s pour irriguer la palmeraie de 18 familles. Située au niveau du Ksar Ouled Sidi Ouali, à Tamantit, la Foggara Anhil est l'une des

foggaras la plus appréciée par la population locale et qui fait toute la particularité de la région de Touat. Son eau est connue par sa bonne qualité. D'ailleurs toute la population d'Adrar s'alimente par cette foggara. Le réseau triangulaire de la foggara possède 18 kasrias, 44 seguias et 26 madjens.

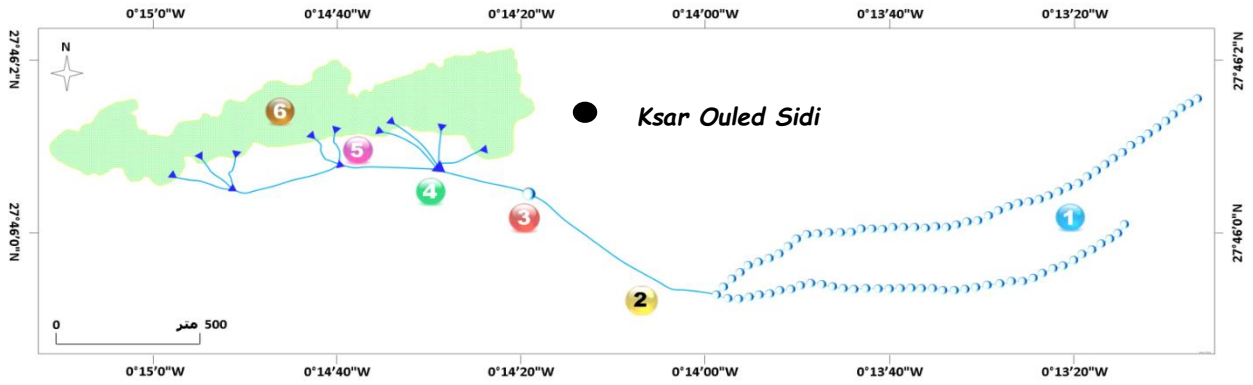


Figure 6.7 : Schéma du réseau de la foggara d'Anhil (Observatoire de la foggara)



Figure 6.8 : Kasria Lkbira de la foggara Anhil



Figure 6.9 : Seguia principale de la foggara d'Anhil

6.2.3. Recommandations à tenir pour exécuter le projet de réhabilitation de la foggara d'Anhil

Chaque jour, la foggara Anhil attire beaucoup de familles et des touristes pour s'alimenter de son eau qui a une excellente qualité. Alors durant le mois de Ramadhan, ce sont des centaines de personnes qui viennent remplir leurs bouteilles et jerricanes. La foggara d'Anhil est d'une grande importance socio-économique pour toute la ville d'Adrar. Dans un état dégradé, avec un débit d'eau qui diminue dans le temps, les autorités locales ont décidé de réhabiliter la foggara. Cependant en absence des bureaux d'études et des entreprises spécialisées dans la réhabilitation des foggaras et surtout la non consultation des spécialistes et des anciens paysans qui possèdent un savoir-faire inestimable risquent de perdre la foggara d'Anhil. Alors aujourd'hui toutes les foggaras qui se réhabilitent, deux nouveaux matériaux ont envahi les oasis du Sahara Algérien. Il s'agit du PVC et du béton qui ont donné une image désolante de la foggara et surtout de l'oasis. Alors de point de vue esthétique, l'architecture d'une oasis n'est plus, car ces entreprises censées réhabiliter ces ouvrages, n'ont jamais réalisé un travail fini même en utilisant ces deux matériaux. Il est à souligner que les canaux à ciel ouvert ou enterrés n'ont jamais été exécutés selon les règles. Or il se trouve que l'aménagement de ces foggaras réalisées depuis plus de 25 siècles ont été effectuées selon les lois et les relations hydrauliques. A titre d'exemple, la seguia ou le canal rectangulaire à ciel ouvert, ont été aménagés suivant les notions de la section économique ; Malheureusement ce n'est pas le cas aujourd'hui, l'ancien canal (dimensionné) détruit et remplacé par une conduite de PVC ou un canal fermé en béton dans l'aire de la section

est complètement différente de l'ancien canal. Alors ce que nous pouvons tirer de cette étude basée sur des missions sur le terrain, la réhabilitation des foggaras doit revenir aux hydrauliciens avec la consultation des oasiens qui ont savoir-faire dans ce domaine. Pour minimiser ces constructions anarchiques dans notre oasis et qui vont conduire automatiquement vers la dégradation des foggaras dans une première phase puis vers l'abandon de ce patrimoine hydraulique dans une seconde phase, nous proposons les recommandations suivantes:

- La réhabilitation de la foggara d'Anhil est une mission complexe et ne ressemble pas à d'autres ouvrages hydrauliques comme un barrage, un réseau d'AEP ou une station d'épuration.
- Augmenter le débit de la foggara et garder la qualité de l'eau de la foggara, ce sont les deux paramètres qu'il faut protéger.
- Éviter de réaliser un forage dans la palmeraie ou à côté de la foggara dont le but est d'augmenter son débit afin d'éviter de perdre la qualité de son eau. Le forage creusé dans la palmeraie exploite une autre nappe d'une qualité mauvaise.
- Creuser une branche de galerie (Kraa) ou creuser un prolongement de la galerie mère (Tarha) pour garder la bonne qualité de l'eau.
- Introduire dans l'oasis les matériaux comme l'argile, le gypse, les roches.
- Ne pas cimenter ou introduire une conduite en PVC dans la galerie de transport dans le but de réduire les infiltrations. Une telle opération s'effectue au détriment de la qualité de l'eau.
- Ne pas introduire les conduites en PVC dans le réseau de distribution dans le but d'éviter l'évaporation de l'eau s'écoulant dans les seguias. Une telle opération élimine l'humidité dans les jardins. La palmeraie joue le rôle d'un climatiseur naturel durant les périodes de grandes canicules grâce à l'humidité dégagée par l'évaporation émanant des eaux des seguias, des madjens et kasriates.

6.2.4. Conclusion

Comme nous l'avons mentionné au début de ce modeste chapitre, le projet de réhabilitation d'une foggara n'est pas une opération aussi simple. Réhabiliter la foggara, c'est corriger toutes les anomalies tout en essayant de garder tous les paramètres constants comme l'environnement oasien, l'évaporation, la qualité de l'eau, la quantité d'eau exigée par la durabilité de ce système hydraulique. Il existe un seuil à ne pas dépasser sinon, il risque un rabattement de la nappe. L'esthétique de l'oasis est exigée pour attirer les curieux et les touristes. Tout ce travail doit être l'œuvre d'un bureau d'étude ou d'une petite entreprise constituée d'hydrauliciens qui vont prendre en charge les projets d'habitations des foggaras. La poursuite de réhabiliter avec les anciennes méthodes accroîtra la dégradation des foggaras et par conséquent l'abandon de ce patrimoine.

Conclusion générale :

Comme nous l'avons mentionné au début de ce document de mémoire de fin d'étude que la foggara a bien joué un grand rôle dans le développement des oasis à travers le territoire du Sahara algérien.

Si aujourd'hui, nous dégustons des délicieuses dattes, c'est grâce à la foggara, cependant, ce système hydraulique millénaires se trouve aujourd'hui dans un état très dégradé.

Dans la Wilaya d'Adrar, capitale de la foggara, il y avait 20 cycles en année, plus de 1000 foggara priant l'eau de la nappe du Continental intercalaire. Malheureusement aujourd'hui il ne reste environ 300 foggaras en service.

L'état a contribué au maintien de cette technique par le financement afin de la réhabiliter, cependant l'absence des entreprises compétentes et la non consultation de la population ksourienne et plus particulièrement les vieux qui ont un savoir-faire dans ce domaine a renforcé encore la foggara dans "sa mort lente". À travers ce modeste mémoire, nous avons montré qu'il est difficile de réhabiliter les foggaras, faute d'existences plusieurs contraintes qui freinent les opérations de réhabilitations. Seulement nous insistons sur le paramétré "Absence des oasiens" et les spécialistes dans l'opération de réhabilitation.

Il est a constaté que toutes les oasis que nous avons visite, des nouveaux matériaux ont être introduites comme partie intégrante des foggaras. Une telle situation malheureusement a beaucoup contribué à la dégradation et l'abandon de la foggara.

Aujourd'hui, seule un bureau d'étude ou une entreprise spécialisée peut réaliser un projet de réhabilitation des foggaras. Evidemment en tenant compte des avis de spécialistes. Le recours aux vieux paysans devient indispensable pour profiter de leurs savoir-faire inestimables dans la réalisation des foggaras. La création d'une petite entreprise de réhabilitation des foggaras est une bonne chose pour essayer de sauver les foggaras qui sont dans un état très dégradé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Abedrahmane S. (1980). L'eau et le Maghreb. Un aperçu sur le présent, l'héritage et l'avenir. Rapport PNUD. 131-137.
- Agence Nationale d'Intermédiation et de Régulation Foncière (2021). Catalogue: Monographie wilaya d'Adrar.
- AlAmri S, AlGhafri, A. and AbdRahman, N. (2014). Water Management of Falaj Al Khatmain in Sultanate of Oman. Journal of Earth Science and Engineering, Vol. 4. 127-133.
- Al-Busaidy, A. (2010). The Aflaj of Oman: A Living Heritage. Muscat: Ministry of Heritage and Culture.
- Al-Mashani, S. (2006). Hydrogeology of the Aflaj Systems in Oman. Journal of Arid Environments, 64(2), 237-255.
- Al-Nabhani, M. (2004). The Aflaj of Oman: A Historical Perspective. Muscat: Ministry of Heritage and Culture.
- Badgley, P.C. (1967). History of the Colorado River. University of Texas Press.
- Benabdallah, A. (2010). Les foggaras: un patrimoine hydraulique à valoriser. In Actes du colloque international sur l'eau et les patrimoines.
- BenHamza, 2013. Aperçu hydrogéologique et hydro chimique sur le système de captage traditionnel des eaux souterraines « foggara » dans la région d'Adrar. Mémoire de Magistère Université Badji Mokhtar-Annaba.
- Bensaada, M. 2001 (Mémoire de magister : étude hydraulique de la Foggara d'AMREIR (Timimoune), Université de Blida, Département de Génie Rural, Option : Science de l'eau) .
- Bensaada, M., & Remini, B. (2016). The foggaras of the oasis of Adrar (Algeria): the current situation and the prospects for their rehabilitation. Larhyss Journal, 26, 167-181.
- Boustani, F. (2008). Sustainable water utilization in arid region of Iran by qanats. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, 33, 213-216.
- Boutadara, Y., & Remini, B. (2019). Quand la foggara Hadj Amar Lekbir inonde l'oasis

Kessiba (Adrar-Algérie). Larhyss Journal, 38, 103-116.

Bouzaher- Lalouani,S. (2015). La foggara, un système hydraulique multi séculaire en déclin. Le cas du Touat-Gourara-Tidikelt (Sahara algérien). Cahiers de la Méditerranée, 90, 181-192.

CastanyG.(1982):Principes et méthodes de l'hydrogéologie, Dunod université Bordas Paris. France, 237.

Cheylan,Y.(1990).Lessystèmesd'irrigationtraditionnelsenAfriquesaharienne.Paris:ORST OM.

Degoutte,G. (2006). Diagnostic, aménagement et gestion des rivières: hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Tec & Doc Lavoisier.

Direction de l'agriculture d'Adrar, 2021.

Dubost,F ,& Moguedet,G. (1998). Les foggaras de l'Ahaggar. Revue degéographie alpine, 86(4), 61-72.

ElAlaoui,M.(2005).Lesfoggarasdusudmarocain:unpatrimoinehydrauliqueàpréserver.Revue des Géographes, 80(3), 269-278.

ELYES KERTHIOU, Diplômé de l'ENA. Ex directeur du projet de développement communautaire dans le sud (avec le PNUD). Juillet 2000 / décembre 2003. Ex Secrétaire général de la fondation Tassili de SONATRACH, chargée du développement durable dans le sud(2009 /2011))

English,P.W.(1968).TheoriginandspreadofqanatsintheOldWorld.Proceedingsofthe American Philosophical Society, 112(3), 170-181.

Foucauld,C. de (1940). Dictionaries abrégé Tuareg-français de noms propres (dialecte de l'Ahaggar). Larose. 32.

GAST,M.(1998).Foggara. Encyclopédie berbère, 19,2868-2880.

Ghachi,M , & Remini,B. (2018). Irsan: The Largest Foggara of Tidikelt (Algeria) in Decline. Journal of Water Sciences & Environment Technologies, 3(1), 279-248.

Ghachi,M.,Remini,B.,&Hamoudi,S.(2021).WhentheModificationsMadetotheFoggara

- Disturb the Environment. *GeoScience Engineering*, 67(2), 52–632.
- Goblot, H.(1979).Les techniques traditionnelles de captage des eaux souterraines en Afrique du Nord. *Revue de géographie alpine*, 67(3), 5-20.
- Goudarzi,G.(2000). *Qanat: The Underground Aqueducts of Iran*. University of Texas Press.
- Graf,W.H ,& Altinakar,M. (2008). *Hydraulique fluviale: Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple (1ère éd.)*. EPFL Press.
- Kantaoui A, 2016.Contribution a l'étude de l'utilisation des foggaras dans la région de Zaouiet Kounta (Adrar). Mémoire de Master. ENSH, Blida.
- Kobori,I. (1982). Qanats: Ancient underground water supply systems in the Middle East. *World Archaeology*, 13(3), 330-342.
- Lightfoot,D.R. (2000). The origin and diffusion of qanats in Arabia: New evidence from the northern and southern peninsula. *Geographical Journal*, 166(3), 215-226.
- Mohamed Ould Baba Sy. (2005): *Recharge et Paléore charge du Système Aquifère du Sahara Septentrional*. Thèse Doct, Univ, Tunis El Manar, 271.
- Mokdad, M , Mebarki, B., Mokdad, I, & Bouabdallah, L. (2020). Ergonomics of Date Palm Irrigation Work: Algerian Foggara as an Example. *Advances in Physical, Social & Occupational Ergonomics*, 1215, 282–2881.
- Mostafaeipour, A. (2010). Historical background, productivity and technical issues of qanats. *Water History*, 2(1), 61-80.
- Olmo,J.(2005).*La gestión de la gualan- Andalus: La cultura de la gua*. Universidad de Granada.
- Remini, B. (2008). *La Foggara : Une technique traditionnelle d'irrigation (Coll. Études sur l'hydraulique traditionnelle)*. Alger, Algérie : Office des Publications Universitaires.
- Remini, B. (2017). LA Foggara de Tadmait : sans énergie de l'eau du sous-sol à la surface du sol. Article. *Larhyss Journal*, 32, 301-325.

- Remini, B. (2019). La foggara et le ghouf (Algérie) : Quand le forage sonne le déclin. *Larhyss Journal*, 39, 275-297.
- Remini, B. (2022). In the Footsteps of the Foggaras. Article : *Larhyss Journal*, 52, 117-162.
- Remini, B. (2023). When the Foggara Ensures the Water Security of the Oases. *Larhyss Journal*, 53,219-257.
- REMINI, B. (2007). La civilisation de la foggara. Eau, espace et société dans le Sahara algérien. Paris : L'Harmattan.
- Remini, B., Albergel, J., & Achour, B. (2015). L'envasement des barrages en Algérie : quelques exemples algériens. *Larhyss Journal*, (22), 149-163.
- Remini, B., & Achour, B. (2008). Les foggaras de l'Ahaggar : disparition d'un patrimoine hydraulique. *Larhyss Journal*, 14, 149-159.
- Remini, B., & Achour, B. (2010). La foggara en Algérie : un patrimoine hydraulique mondial. *Revue d'études en environnement et aménagement*, 23(2), 39-50.
- Remini, B., & Achour, B. (2012). The foggaras of Bouda (Algeria): from drought to flood. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(6), 1269-1275.
- Remini, B., & Achour, B. (2013). Les foggaras de l'Ahaggar. In *Actes du colloque international sur les foggaras*, 1-10.
- Remini, B. et Achour, B. (2015). The Foggara of Ouled Said (Algeria): The Ingenious System of the Saharan Peasantry. *Larhyss Journal*, 23, 105-117.
- Remini, B., & Achour, B. (2017). The Foggara of Moghrar (Algeria): An Irrigation System Millennium. *Journal of Water Sciences & Environment Technologies*, 2(1), 111-116.
- Remini, B., & Ghachi, M. (2019). Le Partage Des Eaux De La Foggara D'irsan De L'oasis D'in Ghar (in Salah-algerie), 135-156.
- Remini, B., & Ghachi, M. (2021). The Foggaras of Ezzaouia Oasis (Algeria): The Water Always Flows Under the Sand. *Technology Reports of Kansai University*, 63(2), 2113-71283.

Remini, B., & Kechad, R. (2012). The Foggara in the Arab World. *Geographia Technica*, 1(1), 1-712

Remini, B., & Kechad, R. (2012). The foggaras of In Salah (Algeria): the forgotten water heritage. *Water Science and Technology: Water Supply*, 12(6), 845-849.

Remini, B., Achour, B., & Kechad, R. (2013). The Foggara of In Salah (Algeria): The Forgotten Heritage. *Larhyss Journal*, 15, 85-951.

Remini, B., Kechad, R., & Achour, B. (2013). The Sharing of Water in the Oases of Timimoun: Cultural Heritage Declining. *Larhyss Journal*, 15, 113-1222.

Remini, B., Achour, B., & Kechad, R. (2014). La foggara en Algérie : un patrimoine hydraulique mondial. *Revue des sciences de l'eau*, 27(1), 81-93.

Remini, B., Achour, B., & Kachad, R. (2014). The Triple Foggara of Ouled Said (Algeria): The Ingenuity of the Saharan Peasantry. *Larhyss Journal*, 15, 113-1223.

Remini, B., & Achour, B., Rezoug, C. (2014). The Foggara of Kenadsa (Algeria). *Larhyss Journal*, 18, 93-105.

Saadi,A. (1984).WATER MOVEMENT IN A STRATIFIED SOIL. Master thesis. 90

Saberioon et Gholizadeh 2010 Sabrioon, M., & Gholizadeh, A. (2010). The Qanat System in Iran and Its Sustainable Revival. *Water Resources Management*, 24(10), 2111-2126.

Saidi, A. (1983). Simulation of naturally fractured reservoirs. *Journal of Petroleum Technology*, 35(1), 123-132.

SI Ahmed le kyyal; détenteur des carnets détaillés des foggaras des ksour sud de Timimoune. Fonction familles 'heredities. Grand connaisseur de l'histoire des foggaras.)

Smith, J. (1992). Traditional water harvesting. *Intermediate Technology Publications*.

Tayara Z. (2015). Integrated Water Management for Aflaj System in Oman Different Approach. *Journal of Agricultural Science and Technology A* 5 (2015) 811-823.

Towner, W. S. (1984). *The Hydraulic Civilization of Iran and the West : A Comparative Study*. University of California Press.

UNESCO. (1972). *Qualité chimique des eaux : Algérie/Tunisie (Rapport de mission). Étude des ressources en eau du Sahara Septentrional*, 6[7].

Zegait, R., & Bensaha, H. (2019). Impact de la mauvaise gestion des eaux sur le déséquilibre de l'écosystème oasien du sud algérien (cas de l'Oasis d'In-Salah). *ASJP*, 104040.

Abdullah Al-Ghafri, 2018

Al-Marshoudi, 2018

(Armando Lancastre, 2010).

GHAOUI N., HADJ ALI S., 2017

(Ghodbani, 2015)

Hervouet, Thual, Tan et Ryhming

Zaina, Branduini et Zavvari, 2022

(Graf et Altinakar ,2000).

Annexe1:
Résultats d'analyse d'eau de la Foggara. ANRH

Demandeur :	ETUDIANT				
Analyse demandée :	A.F				
Date de réception :	3/10/2015				
N° de laboratoire :	4012				
Designation :	FOGARAS TAMENTIT				
RESULTATS D'ANALYSES					
PARAMETRES	RESULTATS	NORMES	MINERALISATION	RESULTATS	NORMES
PHYSICO-CHIMIQUES		DE POTABILITE	CLORURE		DE POTABILITE
PH	7.89	> 6.5 et ≤ 8.5	Calcium Ca++ mg/l	87	200.00
Conductivité ms/cm	140	280	Magnés. Mg++ mg/l	28	150.00
Turbidité eau brute NTU'	0.11	5.00	Sodium Na+ mg/l	160	200.00
Turbidité eau déc. NTU	-		Potass. k+ mg/l	20	12.00
Residu sec à 110° C mg/l	1080.00	1500.00	Chlorure Cl- mg/l	240	500.00
Temperature °C	-	25.00	Sulfate SO4-- mg/l	250	400.00
PARAMETRES	RESULTATS		Bicarbon. HCO3- mg/l	140	-
DE POLLUTION			Carbonate CO3-- mg/l	0	-
Oxygène Dissous mg/l	-		Silice SiO2 mg/l	-	-
Ammonium NH4+ mg/l	0.090	0.50	TH ° F	33	-
Nitrite NO2- mg/l	0.020	0.20	TAC ° F	12	-
Nitrate NO3- mg/l	20.00	50.00	TA ° F	0	-
O.phosphate PO4- mg/l	0.009	0.50	Minéralisation mg/l	880	-
Mat. Ox.(mil. Ac.) mg/l O2	0.30	5.00	Somme des ions mg/l	945	-
DCO en mg/l O2	23.04	0.30	DBO5 en mg/l O2	1.00	-
INTERPRETATION :					
Eau minéralisée de qualité physico-chimique moyenne					
le prélèvement a été fait par le demandeur					
CHEF DU LABORATOIRE					

Annexe2:

Tableau des coefficients culturels Kc pour diverses cultures.

CULTURE	Stades de développement de la culture					Durée totale de la période végétative
	Initial	Développement	Mi-saison	Fin de saison	Récolte	
Bananier tropical	0.4 -0.5	0.7 -0.85	1.0 -1.1	0.9 -1.0	0.75-0.85	0.7 -0.8
subtropical	0.5 -0.65	0.8 -0.9	1.0 -1.2	1.0 -1.15	1.0 -1.15	0.85-0.95
Haricot vert	0.3 -0.4	0.65-0.75	0.95-1.05	0.9 -0.95	0.85-0.95	0.85-0.9
sec	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.65-0.75	0.25-0.3	0.7 -0.8
Chou	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.9 -1.0	0.8 -0.95	0.7 -0.8
Coton	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.25	0.8 -0.9	0.65-0.7	0.8 -0.9
Raisin	0.35-0.55	0.6 -0.8	0.7 -0.9	0.6 -0.8	0.55-0.7	0.55-0.75
Arachide	0.4 -0.5	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.75-0.85	0.55-0.6	0.75-0.8
Maïs sucré	0.3 -0.5	0.7 -0.9	1.05-1.2	1.0 -1.15	0.95-1.1	0.8 -0.95
grain	0.3 -0.5*	0.7 -0.85*	1.05-1.2*	0.8 -0.95	0.55-0.6*	0.75-0.9*
Oignon sec	0.4 -0.6	0.7 -0.8	0.95-1.1	0.85-0.9	0.75-0.85	0.8 -0.9
vert	0.4 -0.6	0.6 -0.75	0.95-1.05	0.95-1.05	0.95-1.05	0.65-0.8
Pois, frais	0.4 -0.5	0.7 -0.85	1.05-1.2	1.0 -1.15	0.95-1.1	0.8 -0.95
Poivron, frais	0.3 -0.4	0.6 -0.75	0.95-1.1	0.85-1.0	0.8 -0.9	0.7 -0.8
Pomme de terre	0.4 -0.5	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.85-0.95	0.7 -0.75	0.75-0.9
Riz	1.1 -1.15	1.1 -1.5	1.1 -1.3	0.95-1.05	0.95-1.05	1.05-1.2
Carthame	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.05-1.2	0.65-0.7	0.2 -0.25	0.65-0.7
Sorgho	0.3 -0.4	0.7 -0.75	1.0 -1.15	0.75-0.8	0.5 -0.55	0.75-0.85
Soja	0.3 -0.4	0.7 -0.8	1.0 -1.15	0.7 -0.8	0.4 -0.5	0.75-0.9
Betterave sucrière	0.4 -0.5	0.75-0.85	1.05-1.2	0.9 -1.0	0.6 -0.7	0.8 -0.9

Kc	Initial	développement	saison	de saison	Récolte	Total
Haricots verts	0,3-0,4	0,65-0,75	0,95-1,05	0,9-0,95	0,85-0,95	0,85-0,9
Haricots secs	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	0,25-0,3	0,7-0,8
Chou	0,4-0,5	0,7-0,8	0,95-1,1	0,9-1,0	0,8-0,95	0,7-0,8
Vigne	0,35-0,55	0,6-0,8	0,7-0,9	0,6-0,8	0,55-0,7	0,55-0,75
Maïs doux	0,3-0,5	0,7-0,9	1,05-1,2	1,0-1,15	0,95-1,1	0,8-0,95
Maïs grain	0,3-0,5	0,7-0,85	1,05-1,2	0,8-0,95	0,55-0,6	0,75-0,9
Pois	0,4-0,5	0,7-0,85	1,05-1,2	1,0-1,15	0,95-1,1	0,8-0,95
Patates	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,2	0,85-0,95	0,7-0,75	0,75-0,9
Riz	1,1-1,15	1,1-1,5	1,1-1,3	0,95-1,05	0,95-1,05	1,05-1,2
Soja	0,3-0,4	0,7-0,8	1,0-1,15	0,7-0,8	0,4-0,5	0,75-0,9
Betterave	0,4-0,5	0,75-0,85	1,05-1,2	0,9-1,0	0,6-0,7	0,8-0,9
Tournesol	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,7-0,8	0,35-0,45	0,75-0,85
Tabac	0,3-0,4	0,7-0,8	1,0-1,2	0,9-1,0	0,75-0,85	0,85-0,95
Tomate	0,4-0,5	0,7-0,8	1,05-1,25	0,8-0,95	0,6-0,65	0,75-0,9
Blé	0,3-0,4	0,7-0,8	1,05-1,2	0,65-0,75	0,2-0,25	0,8-0,9

Annexe 3 :

Ordre de Service pour le commencement des travaux aménagement de la Foggara Anhil en 2016 par DRE.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية			
مديرية الموارد المائية لولاية أدرار			
رقم العملية	007/FSDRS/WA/DPSB/2014	رقم	التاريخ
إعادة الاعتبار	أدرار للفقاير عبر الولاية	47	22 نوفمبر 2016
المشروع	إعادة الاعتبار لفقارة " الهيل " قصر سيدي وعلي بلدية تمنطيط الحصة رقم 12		
مدة الإنجاز	06 أشهر		

أمر باستئناف أشغال الملحق

السيد : بومدين محمد مسير مقاولات مختلفة و الذي مجوزته الاتفاقية الخاصة بإعادة الاعتبار لفقارة " الهيل " قصر سيدي وعلي بلدية تمنطيط الحصة رقم: 12 المؤشرة من طرف المراقب المالي تحت رقم : 769 بتاريخ : 21-05-2015 مدعو لاستئناف الأشغال الإضافية حسب الملحق رقم: 01 المؤشر تحت رقم : 1190 بتاريخ : 21-11-2016

رؤس
الموارد المائية لولاية أدرار
إسماعيل عبد الحكيم بوسيا
هذه الرقعة
التفويض منه

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة الموارد المائية و البيئة

مديرية الموارد المائية لولاية أدرار

إشعار باستلام أمر باستئناف الأشغال

أنا المضي أسفله السيد: بومدين محمد مسير مقاولات مختلفة الساكن بـ: حي عيسات إيدير أدرار أصرح بأنني استلمت من مديرية الموارد المائية لولاية أدرار

أمر باستئناف الأشغال مسجل تحت رقم: 47 بتاريخ: 22 نوفمبر 2016

أستلم بتاريخ: 2016.11.27

المقاول



20 Dec 2016
استلام مؤقت

Annexe 4 :

Ordre de Service pour le commencement des travaux aménagement de la Foggara Anhil en 2024 par DRE.

التاريخ	رقم	رقم العملية
2024 ماي 12	42	NE 5.322.8.262.101.16.01
إعادة الاعتبار للفقير عبر الولاية		
المشروع		
الحصة 49: إعادة الاعتبار لفقارة انهيل قصر سيدي وعلي بلدية تمنظيط		
مدة الانجاز		
04 أشهر		

أمر بالإنطلاق في الأشغال

السيد: بن عمر عبد القادر مسير مؤسسة أشغال البناء و الري بن عمر عبد القادر و الذي يجوزته الاتفاقية الخاصة بإعادة الاعتبار لفقارة انهيل قصر سيدي وعلي بلدية تمنظيط الحصة رقم: 49 و المؤشرة من طرف المراقب المالي تحت رقم: 24 بتاريخ: 2024/04/16 مدعو للإنطلاق في الأشغال الصنفقة



إمضاء: كزازی ميلود

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مديرية الموارد المائية لولاية أدرار

إشعار باستلام أمر بالإنطلاق في الأشغال

أنا الممضي أسفله السيد: بن عمر عبد القادر مسير مؤسسة أشغال البناء و الري بن عمر عبد القادر الساكن ب: شارع تيليلان رقم 01 أدرار، أصرح بأني استلمت من مديرية الموارد المائية لولاية أدرار أمر بانطلاق

الأشغال مسجل تحت رقم: 42 بتاريخ: 2024 ماي 12

أستلم بتاريخ 2024/06/06

المقاول



Annexe 5 :

Demande d'une dérivation provisoire afin d'assurer l'écoulement de l'eau de la Foggara Anhil par des propriétaires du dit Foggara.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

تمنيط في: 2024/07/11

بلا

ولاية : ادرار
دائرة : فنوغيل
بلدية: تمنيط
جمعية : فقارة أنهيل
الرقم : 2024/10/1

الموضوع: بخصوص شق منفذ جديد بفقارة أنهيل

في إطار متابعة وصيانة فقارة أنهيل (الشفافية) ارتأت الجهات التقنية بمديرية الري لولاية ادرار على ضرورة شق مجرى جديد يمتد لمسافة قدرها 40 متراً تفادياً للأخطار التي قد تنجم عن العمل في مكان العطب على مستوى الفقارة .

بينما لم يقتنع خبراء ومالكو الفقارة بشق مجرى جديد ويرون أن الأحسن أن تبقى الفقارة في مجراها القديم ويتم خدمته وإصلاحه ولا يرون أن ذلك يشكل خطر لا على العمال ولا على الفقارة .

ورغبة من ملاك الفقارة وخبرائها في عدم تعطيل المشروع نعلن عن موافقتنا على انطلاق المشروع

بشطين اثنين :

1 - بقاء المجرى القديم وعدم مسه بأذى .

2 - عدم التوقيع على استلام المجرى الجديد إلا بعد ثبوت نجاعته وتدفق الماء بانسيابية في مجرى الفقارة الأصلي .

وعلى الله الكمال والسلام عليكم ورحمة الله وبركاته

رئيس الجمعية

توقيع ملاك الفقارة

6

جمعية فقارة أنهيل بلدية تمنيط
بلدية تمنيط - دائرة فنوغيل - ولاية ادرار
إعتماد رقم : 22 بتاريخ : 2023/08/29

- بكر اوي بكرى
- بكرى عبد الكريم بن محمد الشاهد بكرى
- بكرى عبد العزيز بكرى
- زاوكي عبد الله بكرى
- بكرى عبد الكريم بن محمد بكرى
- علي سالم بكرى
- نايري محمد بكرى
- صالحى سالم بكرى

نسخة للإعلام إلى السادة

- مديرية الري لولاية ادرار

- مسؤول المقاطعة

رئيس المجلس الشعبي البلدي لبلدية تمنيط

مصلحة الري الفلاحي
* الوارد رقم : 2024
بتاريخ : 14 جويلية 2024
هـ : 138

بلدية الموارد المائية لولاية ادرار
الوارد رقم :
بتاريخ :
هـ : 138