

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique

Ecole Doctorale En Science De L'eau Et Développement Durable



OPTION : Traitement Des Effluents Industriels

Laboratoire De Recherches des Sciences de L'Eau

Mémoire Présenté par

SLIMANI SAID Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Intitulé

Étalonnage de différents systèmes traditionnels(*Chekfa*) de mesure de débits en vue d'une restitution du réseau hydraulique de distribution d'une foggara

En vue de l'obtention du diplôme du magister en traitement des effluents industriels

Soutenu le : 27/01/2011 devant le jury :

	Nom	Prénom		Etablissement
Président	M ^r . BENRACHDI	Khaled	Professeur	U.N.B.B
Rapporteur	M ^r . BENZIADA	Salim	M.A.A	E.N.P
Examineurs				
	M ^{lle} . BENMAMAR	Saâdia	M.C.A	E.N.P
	M ^r . BESSENASSE	Mohamed	M.C.A	U.S.S.D
	M ^r . LOUHAB	Krim	Professeur	U.N.B.B

ENP, 2011

REMERCIEMENT

A l'issu de ce mémoire, Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé tout au long de ce travail.

Ma reconnaissance va plus particulièrement à :

Mon promoteur Monsieur BENZIADA.SALIM pour sa contribution à l'élaboration de ce mémoire.

Mon respect aux membres du jury qui me feront l'honneur d'apprécier mon travail Mr Pr. BENRACHDI KHALLED, Professeur à l'université de Boumerdes et qui a bien voulu présider le jury, ainsi que Mr LOUHAB KRIM Professeur à l'université de Boumerdes, M^{lle}. BENMAMAR SAADIA Maître de conférence à l'Ecole Nationale Polytechnique et Mr BESSENASSE MOHAMED Maître de conférence à l'université de Blida qui ont tous les trois bien voulu examiner ce modeste travail.

Monsieur KETTAB AHMED Professeur et coordonateur de l'Ecole Doctorale Sciences de l'eau et Développement durable. Pour ses directives et ses conseils.

Je ne saurais oublier l'ensemble des enseignants notamment Mr NOURI, M^{me} BAHBOUH,L qui m'ont suivi durant mon cycle d'étude.

S.SLIMANI

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance et de respect

à :

-  *Mes parents*
-  *Mes frères et sœurs*
-  *Toute ma famille*
-  *Mes amis à L'ENSH et à l'ENP.*

تطرقنا في هذه المذكرة إلى دراسة نظام السقي بالفقارة في منطقة توات قورارة تيديكلت بولاية أدرار، كما تطرقنا إلى طريقة تقسيم المياه بالقسرية باستعمال الشقفة، بالإضافة إلى دراسة فعالية شبكة التوزيع وذلك عن طريق معايرة الاداة المستعملة الشقفة حيث قمنا بتجارب مخبرية ، النتائج المستخرجة من هذه التجربة و بعد دراستها عن طريق القوانين الاحصائية بينت لنا مدى صحت التقسيم في نظام الفقارة

الكلمات الرئيسية: الفقارة, نظام السقي, وحدة القياس, الشقفة, الانحدار الداتي

Résumé:

Une description du système de foggara, son mode de fonctionnement ainsi que son origine et son implantation dans le monde est traité dans ce mémoire. Une définition des éléments hydrauliques du régime d'écoulement a surface libre du réseau établi par le système de foggara a été explicitée.

Une revue des systèmes traditionnels de mesure des débits, ainsi qu'une description des types de débitmètre traditionnels (chekfa), avec leurs modes de fonctionnement et les types d'unités de mesure utilisés ont été étudiés. Une étude expérimentale de ces moyens de mesure traditionnels, par la conception et la mise en œuvre d'un dispositif simple de modélisation physique : la chekfa. Un étalonnage et une évaluation des débits mesurés ont été réalisés. Puis, un traitement des données expérimentales par analyse statique ont permis de valider les correspondances entre les unités traditionnelles et leur fractions, avec les unités du système de mesure MKSA. Une application à une foggara école pour une restitution hydraulique a été effectuée.

Mots clés : foggara, réseau de distribution, unité de chekfa, ANOV.

Abstract:

A description of the system of foggara, its operating mode like its origin and its establishment in the world is treated in this memory. A definition of the hydraulic elements of the mode of flow has face free of the network established by the system of foggara was clarified. A review of the traditional systems of measurement of the flows, as well as a description of the traditional types of flow meter (chekfa), with their operating modes and types of measuring units used were studied. An experimental study of these traditional means of measurement, by the design and the implementation of a simple device of modeling physique : the chekfa. A calibration and an evaluation of the measured flows were carried out. Then, a processing experimental data by static analysis made it possible to validate the correspondences enter the traditional units and their fractions, with the units of the system of measurement MKSA. An application to one Foggara drill for a restitution hydraulic.

Key words: foggara, distribution network, unit of chekfa, ANOV.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1 : Situation géographique de la région d'étude (Gourara, Touat et Tidikelt) (Jean BISSON_1990).	04
Fig. 1.2 : Carte des affleurements géologiques du bassin occidental (Rapport bassin Occidental 2005) (M. Ould Baba Sy ; M. Besbes_2005)	07
Fig. 1.3 : Coupe géologique nord – sud (Rapport bassin occidental 2005)(ANSARI TAHA 2006)	07
Fig. 1.4 : Délimitation de l'extension de l'aquifère source Rapport SASS_2003	08
Fig.2.1. L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer utilisé par les Romains _ Pierre ayser , Guy Waringo	14
Fig.2.2 . Vue aérienne à un puits appartient a L'aqueduc souterrain des aschpëtzer_ Pierre Kayser , Guy Waringo	14
Fig.2.3. Vues latérales et supérieures schématiques d'une apparence de karez _ Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang_2006	17
Fig.2.4. Vue aérienne du système de karez dans l'oasis de Turpan_ photo courtoisie de George Steinmetz.	18
Fig2.5. Creuse un axe vertical (courtoisie de photo de Geroge Steinmetz).	19
Fig.2.6 : Construction d'un karez dans Turpan, Xinjiang, Chine_ Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang_2006	20
Fig.2.7. Nettoyage d'un canal souterrain (courtoisie de photo de George Steinmetz) Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang_2006	20
Fig.2.8. Un canal de l'eau reliant un <i>karez</i> à la ferme_Faisal Farooq Khan_2006	21
Fig.2.9. Un falaj de Ghaily dans le village de Nakhal_photoAbdullah S. Al-Ghafri Novembre 2001.	23
Fig.2.10. Coupe d'un falaj de daudi (qanat) dans la zone de Piémont traduit par Slimani. S d'après Wilkinson, 1977).	24
Fig.2.11. Tasa de falaj Saiq à Al Akhdhar de Jabal	26
Fig.2.12. Division d'écoulement dans des systèmes d'aflaj	27
Fig.2.13. Carte des khattaras de tafilalet sur fond d'image satellite (2006)	29
Fig.2.14. Alignement des cônes d'éjection de plus d'une dizaine de galeries drainantes dans la région du Tafilalet – khattara Lahlouha (Maroc	29

Fig.3.1. Photo satellite de localisation les foggaras du Sahara Algérien A.N.R.H_2010.	35
Fig.3.2. Carte de positionnement des foggaras de Tamentit A.N.R.H_2010	36
Fig.3.3. Coupe de l'évolution des foggaras Remini_2008 modifier par_Slimani_S	38
Fig.3.4. Taupinières de puits de foggaras le long de la route Adrar Reggane photo benziada.S_ 1997	40
Fig.3.5. Vue en haut d'un puits_photo Slimani _S _2006 Tamentit	40
Fig.3.6. Galerie avant la sortie d'une foggara Photo Slimani_ S_ 2006	41
Fig.3.7. Peigne (kasria) de répartition (Slimani_S _2007)	43
Fig.3.8. Kasria secondaire(Slimani_S _2007)	43
Fig.3.9. Kasria plus petite (tertiaire) (Slimani_S _2007)	44
Fig.3.10. Madjen en argile (Photo Ansari .T_2006)	45
Fig.3.11. Photo montre l'irrigation des gamoun dans le jardin Ansari .T_2006	46
Fig.3.11. Les Seguias Photo Ansari .T_2006	46
Fig.4.1. Schéma de fonctionnement d'une foggara d'après A.Said 1983	50
Fig.4.2. Chekfa région de Tamentit (Slimani.S,2007)	53
Fig.4.3. Chekfa circulaire région de Tamentit (Slimani.S,2007)	54
Fig.4.3. Planchette en Argile représente le nombre des propriétaire d'une foggara avec leur part	55
Fig.4.4. Opération de mesure à l'aide d'une Chekfa circulaire à Aoulef dans la région du Tidikelt (Benziada.s,1996)	57
Fig.4.5. Opération de mesure à l'aide d'une Chekfa rectangulaire à Ain zeghlouf près de Reggane (Benziada.s,1996)	58
Fig.5.1. Orifice non noyés	63
Fig.5.2. Orifice à mince paroi	63
Fig.5.3. Orifice à veine moulée	64
Fig.5.4. Orifice à contraction incomplète	64
Fig.5.5. Orifice noyé	65
Fig.5.6. Dispositif de mesure	67
Fig.5.7. Chekfa de Licha région de Timimoun	70
Fig.5.8. Chekfa de Ouarmoul elkbir région de Tamentit	71
Fig.5.9. Chekfa ouarmoul elserir région de Tamentit	72

Fig.5.10 : <i>Chekfa</i> région <i>Tamentit</i>	73
Fig.5.11 .Variation de débit en fonction de diamètre	76
Fig.5.12 . Variation du débit en fonction des hauteurs	78

LISTE DE TABLEAU

Tableau 5.1 : Caractéristique de <i>chekfa de LICHA</i> (fig 5.8)	68
Tableau 5.2 : Caractéristique de <i>chekfa de Ouarmoul el Kebir</i> (région de Tamentit)	68
Tableau 5.3 : Caractéristique de <i>chekfa de Ouarmoul el serir</i> (région de Tamentit)	69
Tableau 5.4 : Caractéristique de <i>chekfa de Ouarmoul el serir</i> (région de Tamentit)	69
Tableau 5.5 . Valeurs des débits de <i>chekfa ouarmoul el kbir</i>	74
Tableau 5.6 . Valeurs des débits de <i>chekfa ouarmoul el serir</i>	74
Tableau 5.7 . Valeurs des débits de <i>chekfa Licha</i>	75
Tableau 5.8 . Valeurs des débits de Tamentit	75
Tableau 5.9 : Valeurs de débits en l/s	77
Tableau 5.10 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) pour <i>demi habba chekfa de ouarmoul elkbir</i>	82
Tableau 5.11 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>1/3 de habba chekfa de ouarmoul elkbir</i>	83
Tableau 5.12 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>1/4 de habba chekfa de ouarmoul elkbir</i>	84
Tableau 5.13 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>1/6 de habba chekfa de ouarmoul elkbir</i>	85
Tableau 5.14 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>demi habba chekfa de LICHA</i>	86
Tableau 5.15 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>1/3 de habba chekfa de LICHA</i>	87
Tableau 5.16 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>1/6 de habba chekfa de LICHA</i>	88
Tableau 5.17 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) <i>1/8 de habba chekfa de LICHA</i>	89
Tableau 5.18 : Localisation de foggara de <i>makhlouf</i>	90
Tableau 5.19 : Transformation des unités locales (<i>habba, kirat...</i>) en unité universelle (MKSA)	90

Notations et Symboles

d	Diamètre de trou (m)
e	Epaisseur de la paroi (m)
g	Accélération de pesanteur (m/s^2)
H	Hauteur d'eau (m)
m	Coefficient de régularisation de débit
P	Pression hydrostatique (m de colonne d'eau)
Q	Débit une section (m^3/s)
S (\square)	Surface de la section des trous de <i>chekfa</i> (m^2)
V	Vitesse d'écoulement (m/s)
X	Valeur de débit expérimentale explicative
Y	Valeur de débit expérimentale à expliquer
Z	Cote de seuil (m)
ρ	Poids volumique de l'eau (N/m^3)
ε	Valeurs des erreurs
α	seuil de signification 0.05

Terminologie

Aghisrou: sortie du madjen

Chahed : Celui qui représente les propriétaires pendant l'opération de la mesure.

Chekfa (hallafa, sanara) : Plaque de cuivre destinée à la mesure du débit des foggaras dans les régions du Touat, Gourara et du Tidikelt

Djmaa : conseil représentant la collectivité

Djeble (Jabal) : montagne

Erg : massif dunaire

Farmland (s) : terres cultivées

Foggara (karez, kanawat, qanat, khettara, falaj) : galerie souterraine destinée à capter l'eau pour l'irrigation

Habba : Unité de mesure d'eau qui est usité dans la plupart des oasis de la wilaya d'Adrar

Hammada : Plateau rocheux (Sahara)

Hassab : Comptable, qui tient le livre des comptes (zemam) des habba ou parts d'eau.

Hassi : Puits ou regard des foggaras. Ces puits sont utilisés comme accès et élément d'évacuation des matériaux de construction et de curage pour l'entretien de la galerie souterraine de la foggara.

Gamoun : Planche ou compartiment cultivé conçu pour être irrigué; dimensions courantes : 1.50 x 3.00 m et certain moment entre (4 m et 4.5 m).

Gourara : Région nord d'Adrar (Timimoun)

Kasria : Répartiteur d'eau dispositif permettant de partager avec précision l'eau d'une foggara entre les divers propriétaires de parts d'eau appelé « peigne », le partage de l'eau est fait au moyen des barrettes fixées sur une large pierre de grés.

Kasria kbira : Peigne principal qui amène l'eau directement par Aghisrou.

Kasria sghira : Autre peigne de degrés inférieurs

Khalwa : Rester seul dans l'oasis pour changer d'air

Kiel el ma : Le mesureur de l'eau; l'opération se fait au moyen d'une planche percée des trous calibrés. Autrefois, on employait une plaque ou forme cylindrique de cuivre trouée.

Kirat : Unité de mesure équivalent au 1/24 de habba.

Ksar (pl ksour): Village saharien

Majra : Canal à ciel ouvert reliant le puisard et le peigne.

Madjen : Bassin-réservoir récupérant l'eau apportée par la seguia, il n'existe que dans les jardins alimentés par les foggaras à peigne.

- Les dimensions est fonction de la part d'eau du propriétaire.
- Forme : Toujours quadrangulaire, le plus souvent rectangle très allongé.
- Bords : Billons en terre de 30cm à 40 cm d'élévation, tapissés d'argile pour retenir l'eau autant que possible.

Situé dans la partie la plus élevée du jardin.

Luh : Tableau d'affichage ou planche en argile

Melk : Bien privé

Muqanni : Les constructeurs des qanats

Reg : plaine caillouteuse (Sahara)

Seguia : Conduite d'eau ancienne, les gens ont utilisé les joints sont qui bouchés avec de l'argile; maintenant elles sont souvent en ciment. Les seguias extérieures à la palmeraie sont couvertes par des tuiles d'argile séchée pour éviter l'ensablement. La conduite principale des foggaras est recouverte par des dalles de grés recouverts de sable, elle est enterrée d'environ 50 cm, mais elle reste fragile et à la merci du passage d'un véhicule.

Seguia kbira : Grande seguia qui permet de conduire l'eau du l'embouchure de la foggara au point qui permet d'irriguer le maximum des jardins et ou l'on place le peigne répartiteur principal. Ce dernier est fermé par des dalles cimentées avec de l'argile mêlée à du sable, assurant l'étanchéité.

Tidikelt : Sud Est de la wilaya (région d'Aoulef)

Touat ,Gourara et Tidikelt : régions qui forment la wilaya d'Adrar

Touat : Le centre d'Adrar

Zemam : Le cahier de l'enregistrement des mesures effectués par Kial el Ma et transcrit par le hassab (comptable) en présence du Chahed et des ayant droit à la part d'eau.

SOMMAIRE

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1 : SITUATION ET RESSOURCES EN EAU DANS LA REGION D'ADRAR

INTRODUCTION	3
1-SITUATION DU TOUAT,GOURARA ET TIDIKELT	3
2-CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE	4
2.1. Structure du Touat, Gourara et du Tidikelt.....	4
2.2. Stratigraphie de la région d'étude.....	5
2.2.1. Les terrains primaires:	5
2.2.2. Le Continental Intercalaire	6
2.2.3 Les terrains des Gours et Hammadas	6
3-ETUDE DES NAPPES.	8
3.1. Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS)	8
3.2. Le captage de l'eau dans Touat, Gourara et Tidikelt:.....	8
3.2.1 Les nappes peu profondes	9
3.2.2 La nappe de l'Erg.	9
3.2.3 La nappe du Continental intercalaire.....	10
3.2.4 Caractéristiques principales du CI.....	11
CONCLUSION	12

CHAPITRE 2: HISTOIRE DE LA FOGGARA DANS LE MONDE

INTRODUCTION	13
ORIGINE ET DIFFUSION DE SYSTEME DE FOGGARA DANS LE MONDE	13
1 SYSTEME D'AQUEDUC EN EUROPE	13
1.1 Définition du système.....	13
2 NAISSANCE DE SYSTEME DE QANAT EN ASIE.....	15
2.1 Histoire du Système des qanat en Iran.....	15
2.1.1 Localisation de la région (condition d'invention)	15
2.1.2 Définition et conception du Système Qanat	15
2.2.Naissance et developpement du système Karez en Chine	16
2.2.1 Donnée climatologie et topographie sur la région.....	16
2.2.2 Les hypothèse sur l'Origine de système :	16
2.2.3 La structure typique de Karez dans Turpan.....	16
2.2.4 La construction et la gestion de Karez.....	18
2.3 Naissance de karez en Pakistan.....	21
2.4 Systèmes d'irrigation d'Aflaj (foggara) d'Oman	22

2.4.1 Définition, distribution et histoire d'Aflaj	22
2.4.2 Types d'aflaj.....	22
2.4.3 Utilisation de l'eau du Falaj	24
2.4.4 Administration de Falaj	24
2.4.5 Distribution De l'Eau Des Falaj.....	25
3 LE SYSTEME DE FOGGARA EN AFRIQUE.....	27
3.1. Système de khattara en maroc	28
3.1.1. Naissance et évolution de système	28
3.1.2. Principe de fonctionnement du système	28
CONCLUSION	30

CHAPITRE3: HISTOIRE DES FOGGARAS EN ALGERIE (TOUAT-GOURARA-TIDIKELT)

INTRODUCTION.....	31
1. NOTION SUR LE SYSTEME DE FOGGARA (TOUAT, GOURARA, ET TIDIKELT) .	31
1.1. Définition du système :	31
1.2. Conditions d'invention du système.....	31
2. NAISSANCE ET ORIGINE DU SYSTEME DE FOGGARA.....	32
3. NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA FOGGARAS	33
3.1 La localisation des foggaras d'Adrar	34
4. L'EVOLUTION DES FOGGARAS.	37
5. DESCRIPTION DE LA FOGGARA	39
5.1. puits.....	39
5.2. Galerie.....	41
5.3. Les ouvrages hydrauliques de la foggara.....	42
5.3.1. La kasria principale	42
5.3.2. La kasria secondaire	43
5.3.3. La kasria tertiaire	44
5.3.4. Le Madjen.....	44
5.3.5. Les Seguias	45
CONCLUSION	47

CHAPITR 4: PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA FOGGARA

INTRODCTION.....	48
1 . PRINCIPE DE LA FONCTIONNEMENT DU SYSTEME DE FOGGARA.....	48
2. REPARTITION DE L'EAU DES FOGGARAS ET L'ART DU PARTAGE.....	51
3. DEFINITION DE LA CHEKFA.....	52
4. MESURE DES DEBITS PAR LA CHEKFA	55

5. UNITES ET METHODE DE DISTRIBUTION DE DEBIT D'UNE FOGGARA.	58
5.1 Méthodes de distribution :	58
5.1.1 Exemple 1 :	58
5.1.2 Exemple 2 :	58
5.1.3 calcul.....	59
CONCLUSION	61

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 5: ANALYSE ET INTREPRETATION

INTRODUCTION	62
1. ECOULEMENT A TRAVERS LES ORIFICES	62
1.1. Orifices non noyés :	62
1.1.1 Les orifices en mince paroi.....	63
1.1.2. Les orifices à veine moulée	64
1.1.3. Les orifices à contraction incomplète.....	64
1.2. Orifices noyés :	65
2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTALE:	66
3. RESULTATS ET DISCUSSION (INTERPRETATION)	68
3.1. Analyse des données expérimentales :	68
4. ANALYSE DES VALEURS EXPERIMENTALES DE DEBIT	74
5. VALIDATION DES RESULTATS	79
5.1. Le modèle linéaire gaussien	79
5.2. Estimation des paramètres β_1 et β	80
5.3. Les moindres carrés ordinaires	80
5.4. Tests d'hypothèse et intervalles de confiance	81
5.5. Coefficient de détermination :	81
6. ANALYSE DES RESULTATS FINAUX :	82
6.1. Chekfa de ouarmoul elkbir	82
6.1.1 : Modèle linéaire pour demi habba chekfa de ouarmoul elkbir	82
6.1.2 Modèle linéaire pour 1/3 de habba chekfa de ouarmoul elkbir	83
6.1.3 : Modèle linéaire pour 1/4de habba chekfa de ouarmoul elkbir	84
6.1.3 Modèle linéaire pour 1/6 de habba chekfa de ouarmoul elkbir	85
6.2. Chekfa de LICHA région de Timimoun.....	86
6.2.1 Modèle linéaire pour demi habba chekfa de LICHA	86
6.2.2 Modèle linéaire pour 1/3 de habba chekfa de LICHA.....	87
6.2.3 Modèle linéaire pour 1/6 de habba chekfa de LICHA.....	88
6.2.4: Modèle linéaire pour 1/8 de habba chekfa de LICHA	89

7. APPLICATION DES RESULTATS SUR LA FOGGARA DE MAKHLOUF TAMENTIT	90
7.1 Présentation de foggara de makhlouf	90
CONCLUSION	91

INTRODUCTION

Quelle place occupent le Sahara, ses habitants, leur mode de vie et leur us et coutume dans l'imaginaire de ceux qui font partie de cette ère de civilisation? La réponse à une telle question est relativement difficile car non seulement cet imaginaire lui-même n'est pas homogène, mais les différentes dimensions de la perception des caractéristique du Sahara sont complexes.

Le Sahara est un désert mais en même temps un lieu de fécondité, un lieu vide mais source d'inspiration sur la retraite et la *khalwa*, une terre aride mais avec ses traditions reste une zone magnifique à visiter.

En effet, tout développement économique dans cette région est conditionné par la disponibilité et l'utilisation de la ressource en eau. L'irrigation rationnelle constitue alors le facteur principal du développement durable de l'agriculture saharienne.

Les précipitations étant pratiquement inexistantes, les agriculteurs utilisent la méthode d'irrigation intégrale de leur culture par le système de foggara (réalisé en fonction des conditions topographiques).

Au Touat, Gourara et Tidikelt l'irrigation par foggara consiste à apporter de l'eau aux cultures par écoulement gravitaire à partir d'une source souvent très éloignée de l'agglomération populaire « *ksar* » en traversant des galeries souterraines jusqu'au réservoir de stockage « *madjane* ». L'objectif recherché lors de la conception de ce système d'irrigation est de distribuer la quantité d'eau en part équitable selon le nombre des propriétaires et leurs participations. Le partiteur d'eau (mesureur, aigadier) (*Kiel el ma*) utilise un instrument de mesure *la chekfa* nommé ainsi par les *ksouriens*.

La chekfa est une plaque de cuivre qui présente un ensemble d'orifices à diamètre variable et à hauteur de référence bien définie. *Le kiel* intervient par sa *chekfa* plusieurs fois pour finaliser sa tâche noble qui est la répartition exacte des quantités d'eau aux différents irrigants. Ainsi le *kiel el ma* doit être un homme compétant, nommé par la djemaa du ksar en considération de ses connaissances et de son intégrité. La charge du « *Kiel el ma* » passe souvent de père en fils. Bien qu'elle soit le plus souvent confiée à des personnes sans considération de classes ou de castes, une grande considération s'y attache.

L'objectif de ce mémoire est de décrire qualitativement et quantitativement la méthode de mesure traditionnelle utilisée par le *kiel el ma* pour la répartition de l'eau issue de la foggara.

Une évaluation du degré de validité des méthodes et des moyens traditionnels de mesure par confrontation aux méthodes modernes d'étalonnage et de mesure des débits sera décrite et étudiée. Pour ce faire le travail sera décliné en deux parties :

En première partie, le système de foggara sera décrit. Son mode de fonctionnement sera défini ainsi que son origine et son implantation dans le monde et son évolution au cours de l'histoire de l'humanité. L'écoulement de l'eau de la foggara se fait gravitairement et à surface libre vers les champs cultivés. Une définition des éléments hydrauliques du régime d'écoulement à surface libre du réseau établi par le système de foggara sera explicitée le long de cette partie.

En deuxième partie, une étude expérimentale des moyens de mesure traditionnels est effectuée. Un dispositif simple de modélisation physique de l'instrument de mesure *la chekfa* est réalisé. Un étalonnage et une évaluation des débits mesurés par *chekfa* sont étudiés, afin de déduire et valider les correspondances et/ou rapports des unités traditionnelles et leurs fractions avec les unités de système CGS ou bien MKSA.

Enfin, une application des résultats obtenus pour la restitution hydraulique à un réseau d'une foggara conclura ce mémoire.

INTRODUCTION

Le désert est une zone stérile et aride peu propice à la vie. Et cela en raison des sols impropres et de la faiblesse des précipitations (moins de 200 mm par an). Un paysage désertique se reconnaît à son aspect dénudé. C'est le cas de notre zone oasienne englobant le Gourara, le Touat et le Tidikelt.

1. SITUATION DU TOUAT, GOURARA ET TIDIKELT

La région du Touat, Gourara et Tidikelt se présente comme une zone allongée, sensiblement orientée Nord-Sud, d'une longueur de 270 Km et d'une largeur moyenne de 15 à 20 Km. Elle est limitée:

- à l'Est par le plateau du Tademaït ;
- au Nord par le Grand Erg occidental ;
- à l'Ouest par l'Erg Chèche ;
- au Sud par le plateau du Tanezrouft .

Les coordonnées géographiques sont les suivants :

Latitude 26° 30' à 28° 00' N.

Longitude 0° 30' à 1° 8' E.

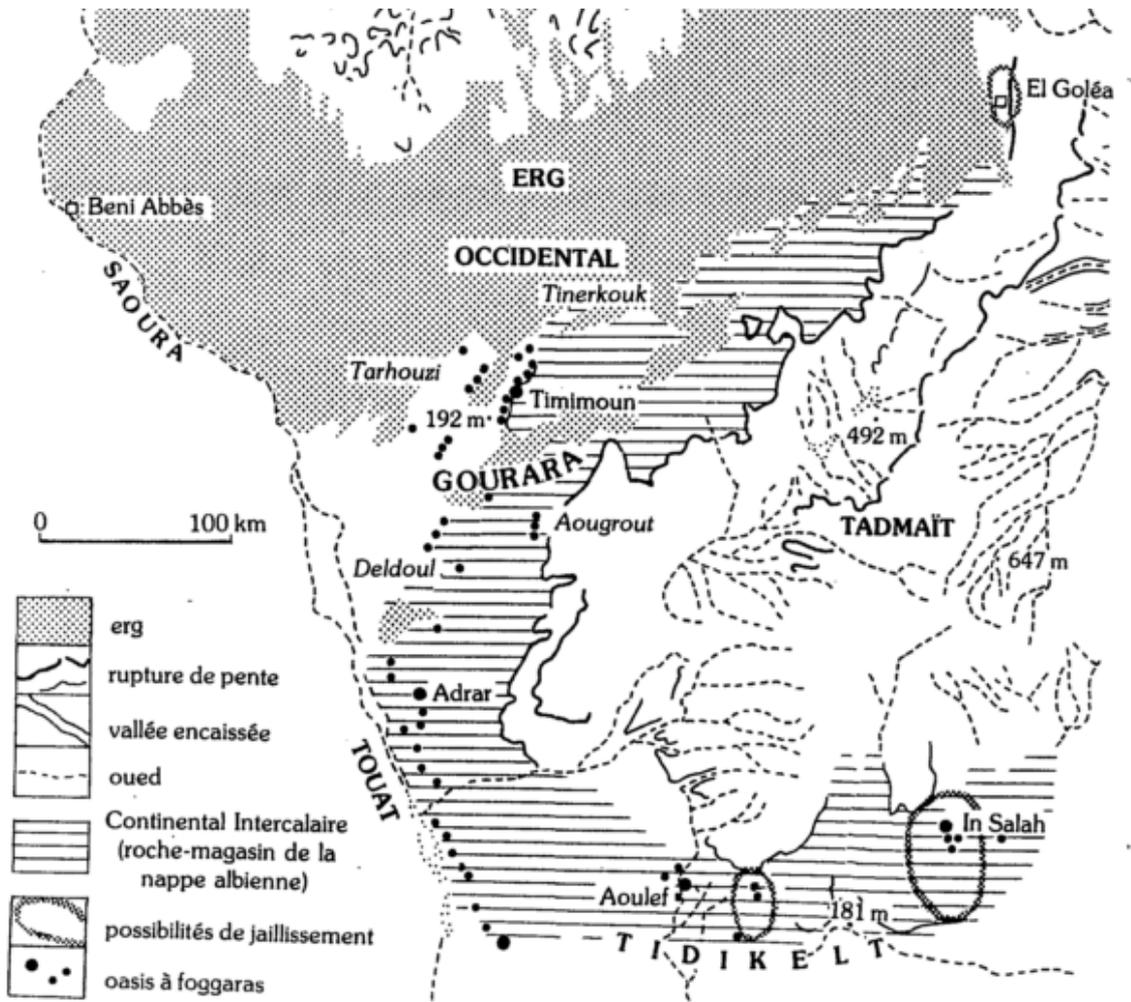


Fig.1.1 : Situation géographique de la région d'étude (Gourara, Touat et Tidikelt) (Jean BISSON_1990).

2. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.1. Structure du Touat, Gourara et du Tidikelt

Géologiquement, cette région se trouve située sur le rebord Sud occidental du vaste bassin secondaire qui s'étend de l'Atlas Saharien à la *Hammada* de *Tinhert* d'une part et du Touat-Gourara au Golfe de Gabès d'autre part.

De Reggan à Timimoun les terrains de cet ensemble structural sont les grès du Continental Intercalaire. Ceux-ci viennent se terminer en biseau sur le substratum Primaire et Anté-Cambrien. Vers l'Est, c'est-à-dire vers l'intérieur du bassin, ils sont recouverts par les terrains

argilo-gypseux de la transgression cénomanienne, eux-mêmes surmontés d'une dalle calcaire Turonienne et de Sénonien. [IRD,2007]

Ainsi, le pendage général des couches du Continental Intercalaire est nul, n'ayant pas subi de tectonique violente; mais si l'on se dirige vers le plateau du Tademaït, le phénomène de subsistance joue, le pendage des couches supérieures reste nul alors que le Continental Intercalaire a tendance à plonger et à s'enfoncer pour atteindre 2 500 m de profondeur dans la région du chott Melhrir centre de la cuvette.

Ces formations du Continental Intercalaire au Sénonien reposent sur le « socle africain » d'âge primaire et infra-Cambrien. Ce substratum apparaît très nettement à la faveur de la disparition du continental Intercalaire dans la dépression empruntée par l'Oued Saoura, oued Messaoud où il forme la limite occidental du Touat; puis dans la région comprise entre Ksabi et Timimoun et enfin, à 25 Km à l'Est de Reggan où apparaissent les affleurements de Primaire du pays Prêtas-silien, qui s'étendent jusqu'aux premiers contreforts du Hoggar

2.2.Stratigraphie de la région d'étude

2.2.1. Les terrains primaires:

Les formations primaires et antérieures sont recouvertes presque totalement, à l'Ouest, par les sables dunaires de l'Erg Chèche et vers le Nord-Ouest dans la région de Charouine et Timirnoun, soit par les dunes du Grand Erg, soit par les « terrains des Gours », couches rouges continentales d'âge tertiaire, horizontales. Le Primaire du Touat-Gourara se présente sous forme de terrains sédimentaires d'une part (schistes, grès, calcaires) et de terrains cristallins d'autre part, ces derniers sont beaucoup plus rares. On trouve ainsi :

- Gothiandien : Schistes et. intercalations de calcaires.
- Dévonien inférieur : calcaires.
- Dévonien supérieur : schistes et argiles.
- Carbonifères inférieur : grès en plaquettes.
- Carbonifère inférieur (Visen) : marnes et argiles noires ou violettes, et grès micacés avec quelques intercalations de calcaires bleus
- Carbonifère moyen et stéphano — Permien de l'Est de Reggan.

Toutes ces formations sont souvent très fossilifères

2.2.2. Le Continental Intercalaire

Du point de vue chronologique les formations du continental Intercalaire sont post-primaires et antécénomaniennes d'où l'impropreté du nom d'Albien donné à cette formation, nom qui conviendrait tout au plus au sommet.

La formation du Continental Intercalaire dans la région d'Adrar repose sur le carbonifère continental avec discordance anglaise. Il y a absence du Jurassique car la faune et la flore que l'on a pu mettre en évidence dans cette région sont probablement d'âge Wealdien (crétacé inférieur).

Du point de vue stratigraphique on note que plusieurs intercalations marines qui existent dans le nord et Est du Sahara disparaissent vers le sud

La limite supérieure du Continental Intercalaire est beaucoup plus régulière: c'est la plupart du temps une série argilo-gypseuse datée du cénomanien inférieur partout recouverte de cénomanien supérieur également marin.

L'épaisseur de ce continental intercalaire par suite du phénomène de subsidence varie dans de grandes proportions, l'épaisseur moyenne parfois citée de 600 m ne représente rien. Vers Laghouat ELbiod sidi Chikh l'épaisseur dépasse 2000 m, par contre au nord du Gourara la série aurait seulement 170 m d'épaisseur.

2.2.3 Les terrains des Gours et Hammadas

Ces terrains qui apparaissent sur toute la lisière sud et ouest du grand erg occidental au bord de l'ouest de Saoura-Messoud et qui forment le sous-bassement de cet erg, sont classés comme appartenant au Miocène et au Pliocène continentaux. Ils comprennent à la base des argiles et des grès plus ou moins rouge-bruns ou jaunâtres surmontés d'une formation Grésocalcaire à silex et calcidoine le tout couronné par des dalles calcaires.(foggara du Touat et du Gourara notice géologique)

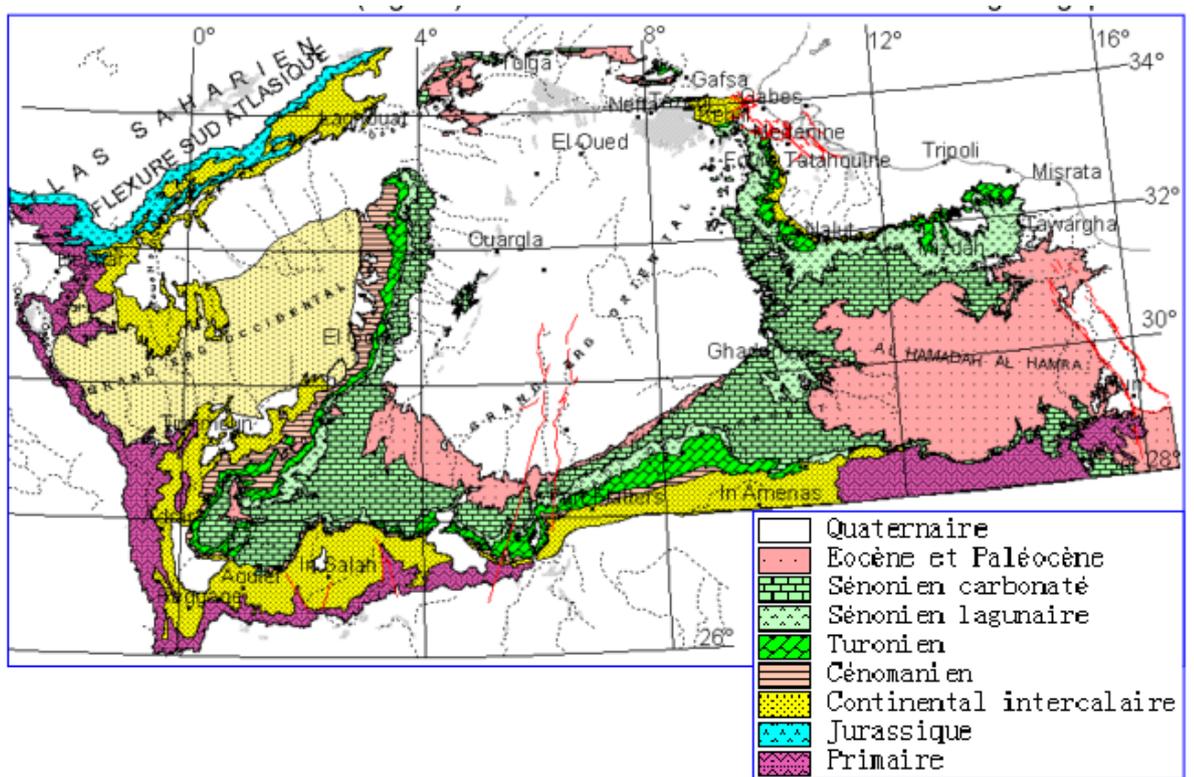


Fig.1.2 : Carte des affleurements géologiques du bassin occidental (Rapport bassin occidental 2005) (M. Ould Baba Sy ; M. Besbes_2005)

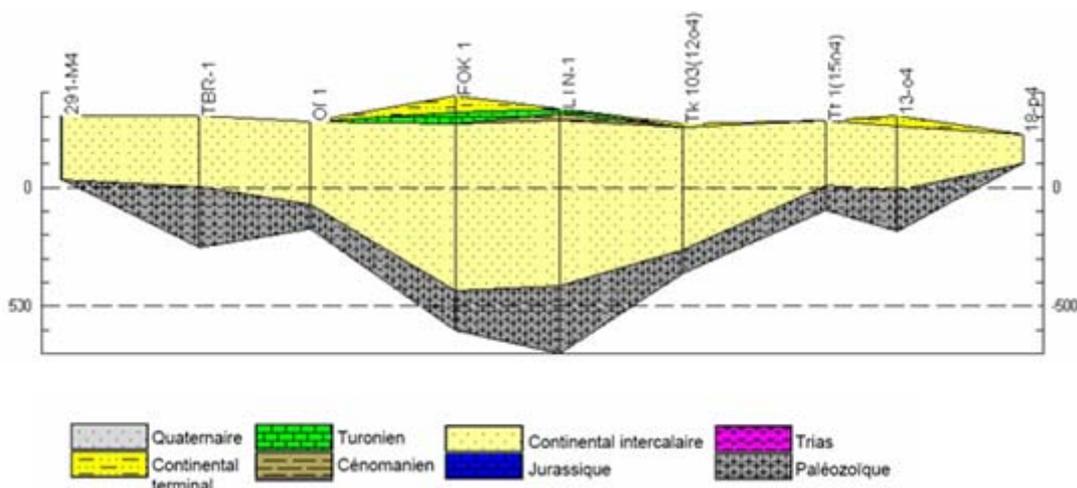


Fig.1.3 : Coupe géologique nord – sud (Rapport bassin occidental 2005) ANSARI TAHA 2006

3. ETUDE DES NAPPES.

3.1.Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS)

Avec près d'un million de km² de superficie, le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) s'étend sur l'Algérie, la Tunisie et la Libye et recèle d'énormes réserves d'eaux souterraines, réserves dont certains auteurs [Burdon d.J, (1977)] s'accordent à dire qu'elles sont très anciennes, et que les gradients hydrauliques observés dans l'aquifère sont des gradients fossiles ou résiduels, hérités des périodes humides de l'Holocène, que la recharge actuelle serait nulle et que les nappes se trouveraient donc aujourd'hui en régime de tarissement pur.

Le système aquifère du Sahara septentrional comprend deux principales couches aquifères profondes: la formation du Continental Intercalaire (CI), la plus profonde, et celle du Complexe Terminal (CT) [Cornet, 1952] . Ce système a fait l'objet de plusieurs investigations, depuis le début des années 1960, qui ont contribué à la description des principales formations aquifères et à la délimitation de leurs extensions[Geopetrole,(1964)] (Fig.1.4).

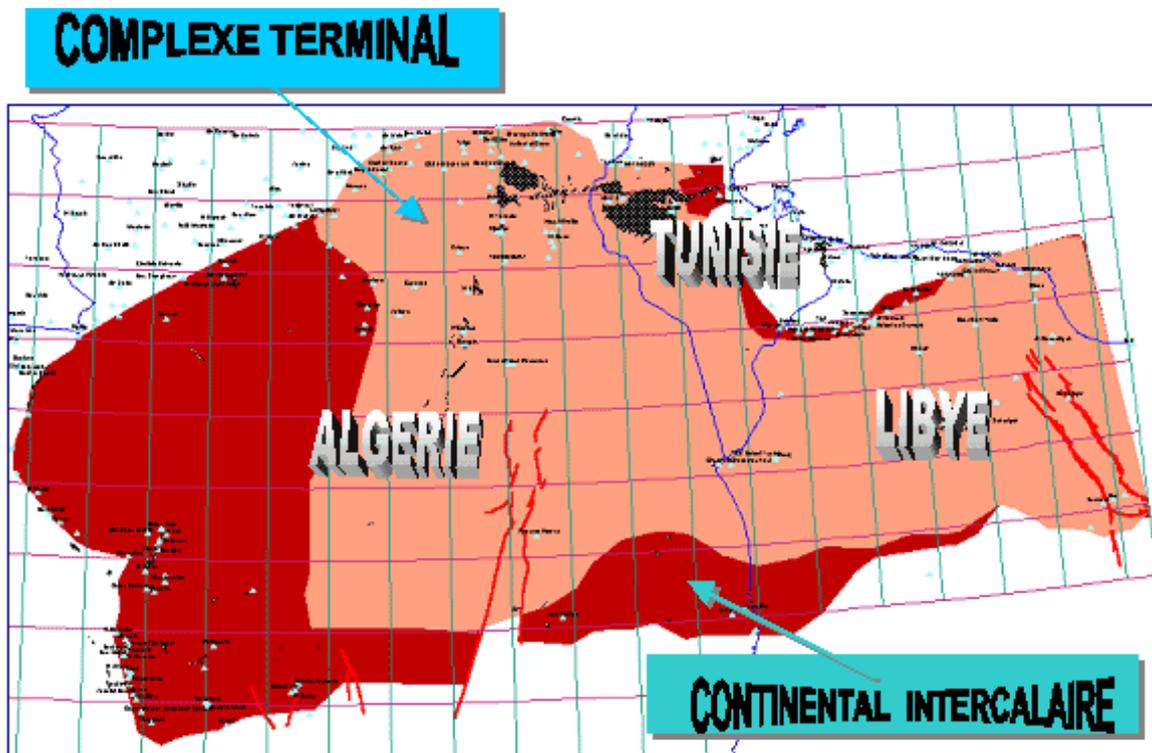


Fig.1.4 : Délimitation de l'extension de l'aquifère source Rapport SASS_2003

3.2. Le captage de l'eau dans Touat, Gourara et Tidikelt:

Les ressources en eau sont essentiellement constituées par les eaux souterraines:

les nappes phréatiques du complexe terminal peuvent être alimentées par les eaux de pluie; la nappe du continental intercalaire (albien) est essentiellement fossile. [M.Ould Baba Sy ; M. Besbes, 2005].

3.2.1 Les nappes peu profondes

- ✓ Les nappes dans la Vallée de l'Oued Rih, sont au nombre de trois. Les deux premières, dites nappes des sables sont artésiennes (jaillissantes). Leur profondeur varie de 30 mètres à 200 mètres. Elles sont fortement salées (4 à 7 g/litre). La troisième, dite nappe des calcaires se trouve à une profondeur comprise entre 200 et 500 mètres.
- ✓ La nappe phréatique de l'Oued Souf est de faible profondeur et son exploitation est aisée.
- ✓ La nappe de l'Oued M'Zab (nappe d'inféoflux) alimentée artificiellement par des petits ouvrages sur le lit de l'Oued M'Zab,; l'eau est canalisée vers des puits d'alimentation.
- ✓ Les nappes du Hoggar alimentées par l'inféoflux des différents oueds [A. Djennane, 1990]

3.2.2 La nappe de l'Erg.

Les visiteurs qui se déplacent entre Timimoun et Charouine remarquent qu'il existe à la lisière Nord du Gourara une multitude de petites palmeraies perdues dans les dunes du Grand Erg Occidental. Les foggaras de ces palmeraies (quand elles existent) s'alimentent à partir d'une nappe très importante circulant sous les dunes à la faveur d'une dépression dans la topographie des puits et foggaras peuvent atteindre cette nappe.

Les eaux de cette nappe de l'Erg peuvent emprunter trois sortes de terrains selon la perméabilité de ceux-ci. Ce sont:

- ✓ les couches rouges ou terrains des Gours
- ✓ Les calcaires de la *Hammada*
- ✓ Les dunes de l'Erg.

Enfin, les eaux de la nappe de l'Erg ont donc comme exutoire principal l'écoulement vers le Gourara puis le Touat, écoulement qui se marque par un sillon visible dans la surface piézométrique ; mais il faut signaler que tout le long de l'Oued Saoura, entre Beni-Abbas et Ksabi de nombreuses sources naturelles et foggaras drainent les eaux de cette nappe en direction de l'Ouest. [Cornet, 1952].

3.2.3 La nappe du Continental intercalaire

Le continental intercalaire s'étend sur tout le Sahara septentrional, il constitue un relais entre les bassins de ces derniers (oriental et occidental). C'est un système multicouche qui s'étend sur une superficie de 800 000 km², et de 600 000 km² d'après une source de la recherche française sur le climat « cycle de l'eau sur le Sahara algérien », sa réserve totale (en théorie) est estimée à un volume de 6.10¹³ m³ soit un débit fictif continu de 1000 m³/s durant 2000 ans (20 siècles). La partie occidentale occupe une superficie de l'ordre de 280 000 km². Elle s'étend sur une grande partie du Sahara algérien

C'est dans les eaux de cette nappe que puisent la presque totalité des foggaras du Touat-Gourara ainsi d'ailleurs que celles du Tidikelt. La puissante formation gréseuse du Continental intercalaire est le réservoir principal du Sahara du point de vue hydraulique. Les exutoires de cette nappe sont principalement la région du bas-sahara (El-Oued-Touggourt) où les eaux sont exploitées par des forages artésiens, et le Touat-Gourara où les eaux sont drainées par les foggaras, au Tidikelt de petites sources sont aussi à signaler.

Dans le Touat-Gourara, le sillon de drainage est très net, la bordure du bassin créacé étant marqué par un nombre de sebkhas qui s'alimentent à la nappe du Continental intercalaire de même que peut être l'inféoflux de l'oued Messaoud. Enfin, par le goulet de Reggan, il est possible qu'une quantité appréciable d'eau passe du bassin du Sahara algérien au bassin de Tanezrouft. Tous ces exutoires du Sud Ouest du bassin expliqueraient la forme des iso-pièzes dans cette région : écoulement à partir du plateau de Tademaït, se dirigeant soit vers le sillon du Gourara, soit vers Adrar et Reggan, soit enfin vers le Tidikelt Sud. La recharge actuelle de la nappe du Continental intercalaire s'effectue par infiltration :

- ✓ des ruissellements à la périphérie du domaine, tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux, notamment de l'Atlas Saharien, mais aussi parfois du plateau du Tademaït.
- ✓ des pluies d'années exceptionnelles sur le grand Erg occidental

Les terrains du Continental intercalaire se caractérisent par de grandes différences dans leur perméabilité.. En effet ,on rencontre des zones de sables grossiers, voire des graviers, non cimentés ou l'eau circule très bien, des zones de sables fins, quelque peu argileux où l'eau ne peut plus circuler aussi facilement, et enfin des bancs argileux, marneux ou des grès très

cimentés parfaitement imperméables. Ces variations de la proportion entre grès et argiles sont relativement importantes.

3.2.4 Caractéristiques principales du CI.

Dans le centre du bassin oriental la nappe est fortement artésienne, profonde et l'eau jaillit à une température élevée, le même cas d'artésianisme se présente dans le synclinal de In Salah et Tit sur la bordure de M'Zab, piémont de l'atlas saharien. Au Touat, Gourara et Tidikelt occidentale, elle n'est qu'ascendante, à une surface libre peu profonde et à des températures normales.

a. Puissance utile du réservoir du CI.

L'épaisseur de la formation du continental intercalaire varie du nord vers le sud et déborde de même vers la Tunisie et la Libye, l'est vers l'ouest. Selon les données des forages semi-profonds, son épaisseur oscille entre 150 m et 400 m

b. Niveau statique de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI).

Le niveau statique de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI) oscille entre 50 à 2000 m par rapport à la côte du sol et peut atteindre 10 m au niveau du plateau de Tademaït (forage Ain Bel bel).

c. Paramètres hydrodynamiques.

Vu la grande superficie du continental intercalaire (CI), les paramètres hydrodynamiques varient d'une zone à l'autre suivant les types de formations géologiques qui prédominent.

- La porosité efficace $n_e = 20 \%$.
- La porosité totale (n) varie entre 22 % et 28 %.
- La transmissivité varie entre 0,1 à 0,001 m^2/s .

d. Le sens d'écoulements des eaux de la nappe aquifère.

Les axes d'écoulements des eaux de la nappe aquifère du continental intercalaire (CI) sont généralement :

- Nord-sud, nord-est et sud-ouest, c'est à dire vers le Gourara, le Touat et le Tidikelt.

L'autre partie s'écoule vers l'exutoire Tunisien et Libyen [M. Ould & M. Besbes ,2005].

CONCLUSION

La géologie du Touat, Gourrara et du Tidikelt est constituée par le continental intercalaire. Il représente le principal réservoir d'eau souterraine. Et, affleure une grande partie de la région du Touat, du Gourrara et du Tidikelt. Il est caractérisé par une grande hétérogénéité (grès, sables, conglomérats et argiles) et par une puissance variable diminuant d'Est en Ouest. L'exploitation d'une telle nappe nécessite un système de drainage relatif aux conditions topographiques locales. Ce système est appelé foggara. Sa naissance et son évolution dans le monde sera décrit dans ce qui suit.

INTRODUCTION

Qanats est un ancien système souterrain de captage de l'eau qui est en usage depuis plusieurs siècles. En Iran et dans plus de 35 pays additionnels dans le monde tels que L'Afghanistan kiraz (encore en fonctionnement), Chine karez (encore vivant), Irak, Iran, pays du Golfe Arabe, Jordanie, Syrie (kanawat), Chypre, Égypte, Afrique du Nord, Espagne Mina jusqu'au XIX^{ème} siècle (région de Madrid), France : mines, sous-terres (encore vivant) : Ardèche, Drôme, Gard, Hérault, Pyrénées orientales, Vaucluse), le Sahara, le Japon, le Yémen, et les Amériques (Cressey, 1958 & Sekai aucun Kangai, 1995) Au Pérou : vallée du Rio Nazca (encore vivant). quelques variantes des douzaines de noms de ces systèmes existent, incluant *qanat* ; *karez* (sud-ouest Asie); *khattara*, *foggara* (Afrique du Nord) et *falaj* (Arabie). [IRD,2007] .

ORIGINE ET DIFFUSION DE SYSTEME DE FOGGARA DANS LE MONDE

1. SYSTEME D'AQUEDUC EN EUROPE

1.1 Définition du système

En Europe et exactement dans le site des *Raschpëtzer*, à proximité de *Walferdange*, le Luxembourg dispose de l'un des aqueducs souterrains d'origine romaine les plus imposants et les mieux conservés parmi ceux situés au nord des Alpes. Il s'agit en fait d'une conduite d'alimentation en eau potable, construite d'après le principe du qanât fig.2.1.

Les connaissances et l'expérience des constructeurs romains dans des domaines techniques tels que la géologie, l'hydrogéologie, la construction de tunnels, la mécanique des sols et la géodésie s'avéraient être absolument remarquables à partir de ce captage de l'eau et d'alimentation de la galerie qui se trouve à 20 mètres sous la surface de la dépression du *Haedchen* et fonctionne toujours de façon à ce que l'eau coule de nos jours encore et ce au moins dans les parties supérieures et moyennes de l'installation Fig.2.1 [Pierre.K & Guy. W, 2002] .

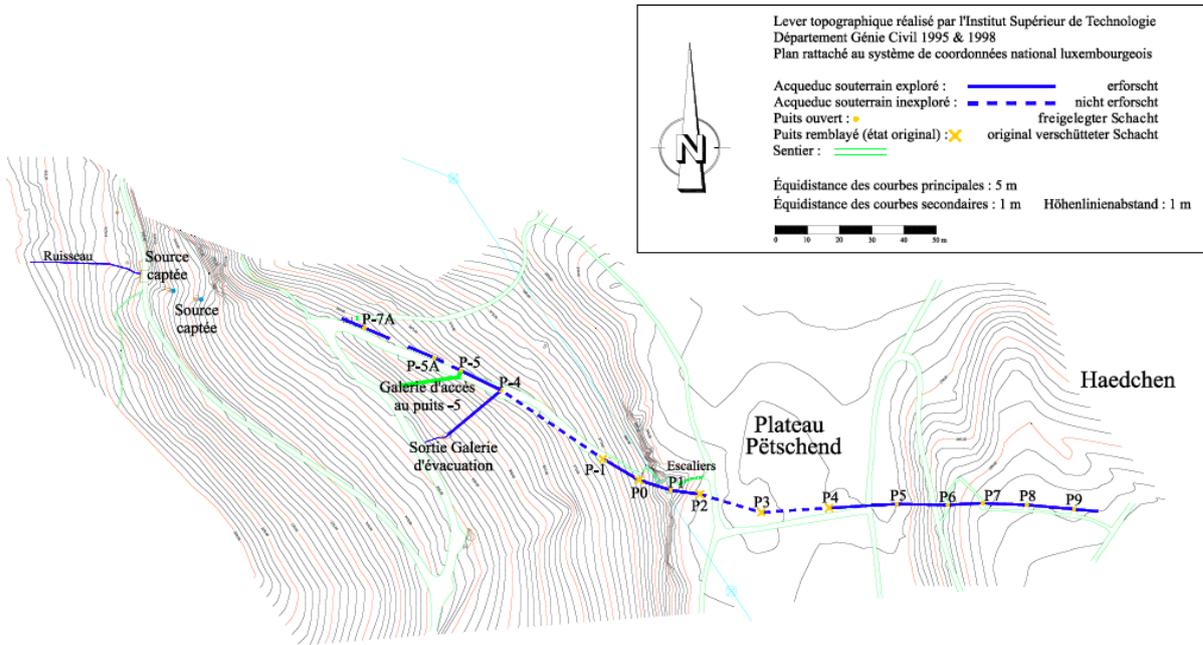


Fig 2.1 : L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer utilisé par les Romains _ Pierre Kayser , Guy Waringo



Fig 2.2 : Vue aérienne d'un puits appartenant à L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer_ Pierre Kayser , Guy Waringo

2. NAISSANCE DE SYSTEME DE QANAT EN ASIE

2.1 Histoire du Système des qanat en Iran

2.1.1 Localisation de la région (condition d'invention)

Le centre de l'Iran est constitué par un haut plateau central, bordé au nord et à l'ouest par les chaînes montagneuses de *Elburz* et *Zagros*. On y trouve deux des plus grands déserts du monde, le *Dasht-i Kavir* et le *Dasht-i Lut*. Au total, 52% du pays est constitué de montagnes et de déserts, entre lesquels se trouve une série de hauts bassins. Le climat étant aride ou semi-aride dans 90% du pays, les zones cultivées sont fortement corrélées avec la disponibilité en eau. Au centre et à l'Est du pays notamment, les précipitations inférieures à 300 mm/an rendent nécessaire l'irrigation des cultures . [FAO, 2005].

Il résulte de ces conditions que la préoccupation pour l'eau en Iran date du début de l'histoire du pays. Les populations ont dû développer des technologies performantes pour développer et gérer les ressources en eau afin de pouvoir s'installer dans des zones marginales. Parmi elles, le *qanat* est considéré comme la plus grande contribution perse faite à l'hydraulique [Ould Baba & Besbes,2005]. Il s'agit d'une technique à caractère minier qui consiste à exploiter des nappes d'eau souterraines au moyen de galeries drainantes. Vieille de plus de 3000 ans. Elle s'est diffusée, avec l'extension de l'empire perse et du monde arabe, dans le monde entier, du Japon au Chili en passant par la zone méditerranéenne. [Kobori I. ,1982].

2.1.2 Définition et conception du Système Qanat

Le *qanat* est un canal horizontal souterrain qui se nourrit dans un aquifère et dans lequel l'eau circule par gravité jusqu'à la surface. La pente du canal doit être calculée de manière à ne pas engendrer des phénomènes d'érosion (pente forte) tout en ayant un gradient suffisant pour ne pas favoriser l'infiltration. En général, le *qanat* se nourrit dans des zones alluviales à environ 50 mètres de profondeur, parfois jusqu'à 300 mètres. La longueur du canal varie en fonction de la profondeur de la source et de la pente du canal, de quelques mètres à plus de 50 Km (le plus long en Iran mesurant 120 Km de longueur) .

Les *qanats* sont construits par des *muqannis* (les constructeurs des *qanats*), dont le savoir se transmet de père en fils.

La détermination de la localisation de la source, qui donnera lieu au forage si la source est permanente, (puits mère) ainsi que la détermination de la pente du canal horizontal souterrain, font appel au haut niveau d'expertise du *muqanni*. En général, une fois le point de sortie de l'eau et la source identifiés, le forage du canal a lieu de l'exutoire vers la source.

Des puits verticaux reliés par le canal souterrain sont creusés tous les 50 mètres environ de manière à aérer les tunnels pour la main d'œuvre. Ils servent aussi à l'extraction du sol vers la surface lors de la construction mais aussi lors des phases d'entretien du *qanat*. En effet, un entretien régulier dont la fréquence dépend de la nature du sol est nécessaire pour éviter le colmatage des canaux souterrains. [Hofmann,2007].

2.2. Naissance et développement du système karez en chine :

2.2.1 Donnée climatologie et topographie sur la région

L'oasis de *Turpan* est située dans la dépression de *Turpan*, le deuxième plus bas point sur la surface de la terre après que la mer morte. *Turpan* est une oasis continentale au climat hyper-aride avec une précipitation annuelle moyenne (9 - 25 millimètres), loin au-dessous de l'évaporation potentielle (environ 3.000 millimètres). Les températures moyennes d'été sont au dessus de 38°C; donc c'est pour ça que le secteur est appelé la '*terre du feu*'. D'autre part les conditions topographiques appropriées ont présenté des conditions idéales pour le développement du système de *karez* (*foggara*) dans la dépression de *Turpan*

2.2.2 Les hypothèses sur l'Origine de système :

L'origine du système de *karez* dans *Turpan* n'est pas entièrement clarifiée. Il y a différentes hypothèses concernant quand et par qui le système a été présenté au secteur.

De nombreux historiens chinois rapportent que le système a d'abord été documenté karez près XI' an, capitale de l'empire Han, au cours de la dynastie des Han environ 2.200 ans auparavant. En conséquence, la technologie de *karez* a été présentée à *Turpan* quand le secteur a été occupé par l'empire de Han. Cette théorie est soutenue par le fait que la conception du système de *Karez* aussi bien que la terminologie pour les différentes pièces du *Karez* doit être très semblable dans les deux régions.

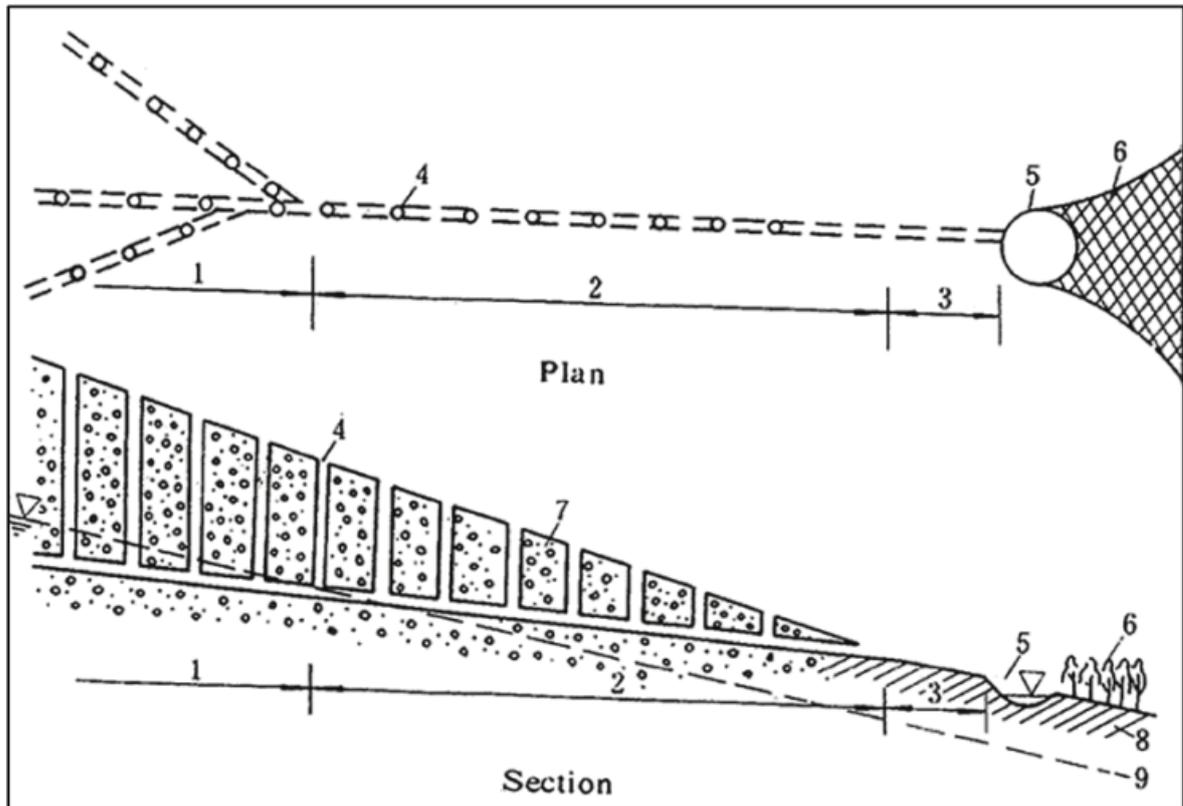
Au contraire, le scientifique américain Huntington, qui a visité la Chine au début du 20ème siècle, a documenté que le *karez* a été présent dès l'Empire persan le long de la route de la soie à une date ultérieure pendant le 18ème siècle. Ceci est une hypothèse, qui plus tard, a été largement disséminée par des auteurs en Europe et en Amérique du Nord.

2.2.3 La structure typique de Karez dans Turpan

Les systèmes de *Karez* sont des systèmes d'irrigation très sensibles composés des axes verticaux, canaux souterrains, canaux de surface et petits réservoirs. La Neige qui tombe au sommet des montagnes voisines est leur source d'eau principale. L'eau est recueillie près des

puits verticaux et conduit par les canaux souterrains à l'oasis, où l'eau est recueillie pour l'irrigation (fig 2.3).

Un *Karez* transporte l'eau principalement sous terre afin de réduire la perte d'eau par évaporation et éviter la pollution d'un part, et d'autre part le *karez* n'exige aucune pompe, donc l'eau se déplace de la haute à la basse terre par l'effet de la pesanteur.



- (1) une eau moissonnant le tunnel souterrain
- (2) un canal souterrain de conduite
- (3) un canal ouvert, (4) verticale jaillit, (5) un petit étang de stockage,
- (6) secteur irrigué, (7) sable et gravier, (8) couches de sol, et (9) la surface d'eaux souterraines.

Fig 2. : Vues latérales et supérieures schématiques d'une apparence de karez _ Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang_2006



Fig 2. :Vue aérienne du système de karez dans l'oasis de Turpan_ photo courtoisie de George Steinmetz

2.2.4 La construction et la gestion de Karez

Karez sont construits manuellement, et la construction peut prendre jusqu'à huit ans.

Les techniques et les outils sont demeurés presque inchangés sur 2.000 ans (voir svp fig.2.5 et fig.2.6).Le processus commence par creuser de la verticale les axes, qui sont alors liés par un canal souterrain. En conclusion, le stockage des étangs sont construits et reliés aux canaux d'irrigation.



Fig 2.5. Creuser un axe vertical (courtoisie de photo de Geroge Steinmetz).

Il exige beaucoup de temps et d'effort pour maintenir le système traditionnel de karez (voir fig.2.7.). Les canaux souterrains ont été couverts par les arbres, la paille et le sol pour empêcher la submersion, la contamination par sable et le gel. Ce genre de couverture marche très bien mais a des inconvénients : elle s'effondre fréquemment et bloque le canal.

Mais certainement une meilleure solution plus onéreuse est d'utiliser une couverture de ciment. Souvent, quand les canaux s'effondrent, des nouvelles sections sont établies pour dévier les passages bloqués. [Qingwei S & ALL,2001]



Fig.2.6 :Construction d'un karez dans Turpan, Xinjiang, Chine_ Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang_2006



Fig.2.7. Nettoyage d'un canal souterrain (courtoisie de photo de George Steinmetz) _ Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang_2006

2.3.Naissance de karez en Pakistan

Historiquement, la présence d'un *karez* dans Balochistan date d'il y a 2.700 ans. Avant l'indépendance du Pakistan en 1947, et avant la sécheresse 1950-52, 22.000 karezes étaient opérationnels dans Balochistan. Cinquante ans après, 12.000 *karezes* étaient encore fonctionnels. Mais aujourd'hui seulement moins de 4.000 *karezes* ont survécu après la dernière sécheresse de 1996 – 2003 qui était également la plus longue et la plus grave sécheresse dans l'histoire du Pakistan.

Le gouvernement provincial de Balochistan, avec l'aide du gouvernement du Pakistan, a récemment accompli la réadaptation de 105 karezes dans la province. Le travail de réadaptation a été limité à l'élargissement de entrées des puits, en réparant les axes verticaux. [Faisal &ALL,2001]



Fig.2.8. Un canal de l'eau reliant un *karez* à la ferme_Faisal Farooq Khan_2006

2.4. Systèmes d'irrigation d'Aflaj (foggara) d'Oman

2.4.1 Définition, distribution et histoire d'Aflaj

Le Sultanat d'Oman est situé dans le sud-est de la péninsule Arabe sur une surface totale approximative de 310.000 km². Oman a une population de 2.2 millions d'habitants en 1997. Oman a un climat chaud et très sec à l'intérieur mais humide dans les secteurs côtiers. Les précipitations moyennes sont de 100 à 200 millimètres [Norman, 1998], excepté la région de sud qui a une période des précipitations intenses de mousson.

Le sultanat est un des producteurs agricoles principaux dans la péninsule Arabe, en particulier concernant la production animale. Cependant, seulement un pourcentage très petit de terre peut être classifié en tant que région agricole. L'agriculture dépend entièrement de l'irrigation. Ainsi plus d'un tiers de l'eau utilisée pour l'irrigation est fourni par le système d'irrigation traditionnel appelé l'aflaj.

Falaj (singulier d'aflaj) est un système de canal construit sous terre qui recueille l'eau souterraine, l'eau des sources naturelles, ou l'eau du à l'écoulement en bas des oueds. Les Aflaj fournissent l'eau aux fermiers pour l'usage domestique et/ou ou l'usage agricole.

Le terme falaj est retiré d'une racine ancienne sémitique, lequel a la signification de diviser, reflétant que les parts de l'eau dans l'aflaj sont divisées entre les propriétaires [Wilkinson, 1977]. Typiquement, une communauté d'exploitation agricole possède toute l'eau du falaj. Chaque fermier reçoit sa part de l'eau selon la taille de son farmland (s) et de sa contribution à la construction d'un falaj. Les Aflaj varient en fonction de la dimension, de la plus petite, relative à celle qui est possédée par une famille simple, à la plus grande et fournissent l'eau aux centaines de propriétaires. Bien que la plupart des aflaj à Oman soit entièrement possédée par des fermiers, il y a un certain aflaj qui sont la propriété du gouvernement [Wahby.H, 1995] ou sont communalement possédés, servant, par exemple, aux mosquées, ou sont éventuellement réservés [Al-Abri .B, 1980]. Beaucoup de villages et villes à Oman ont plus d'un système de falaj. La technologie d'Aflaj a été adoptée à Oman il y a 1.500 à 2.000 ans [Sutton.S,(1984)], et certains de ces systèmes remontent à l'époque de l'occupation perse de Oman. [Wilkinson, 1977] .

2.4.2 Types d'aflaj

Les Aflaj à Oman sont classés en trois types selon leur source d'eau: ghaily, daudi, et ainy aflaj

- **L'aflaj de Ghaily** représente 50% de tout les aflaj à Oman. Leur source principale de

l'eau est l'écoulement de base des oueds (fig.2.9). Typiquement, le canal a une longueur de 200-2.000 m.

- **L'aflaj de Daudi** représente 25% de l'aflaj à Oman. Leur source d'eau est un puits mère. Il est semblable au qanat en Iran et la foggara dans le sud algérien, l'eau profond dans ce type d'aflaj est conduit par un tunnel souterrain qui peut être long que des dizaines de kilomètres et, Par conséquent, la population locale a ouvert puits d'accès pour la circulation d'air et de l'entretien (fig.2.10)
- Dans **ayni aflaj**, la source de l'eau est une source naturelle prénommée ayn (ain).

Le ayni aflaj représentent 25% du aflaj en Oman. La longueur du canal peut être jusqu'à un kilomètre.



Fig.2.9. Un falaj de Ghaily dans le village de Nakhal_photoAbdullah S. Al-Ghafri Novembre 2001.

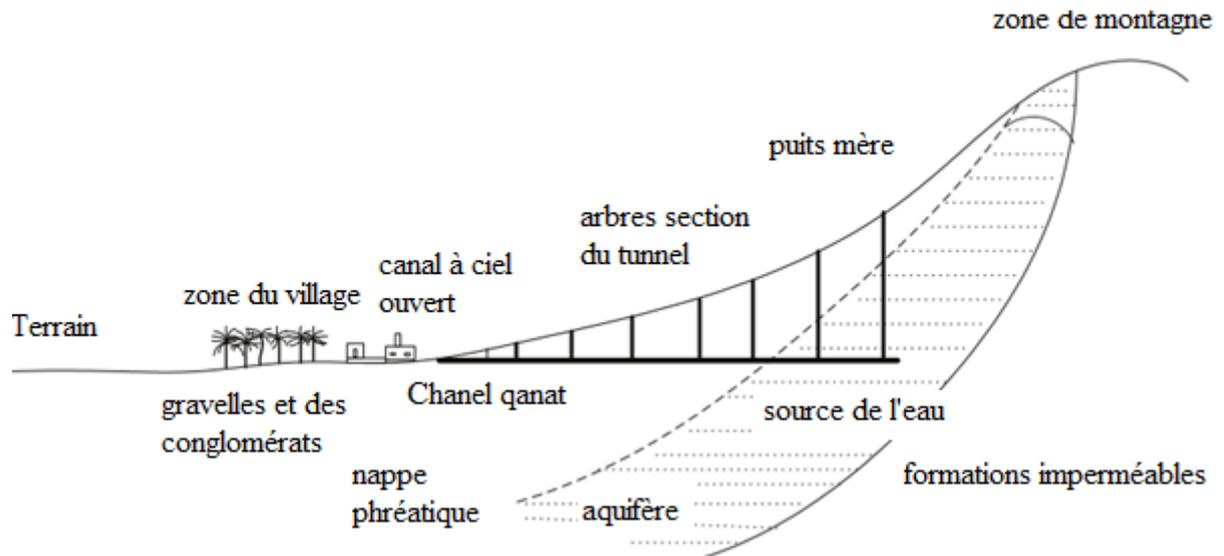


Fig.2.10. Coupe d'un falaj de daudi (qanat) dans la zone de Piémont traduit par Slimani. S d'après Wilkinson, 1977).

2.4.3 Utilisation de l'eau du Falaj

Les systèmes d'aflaj sont conçus de telle manière qu'une demande domestique de l'eau soit principalement deservi, suivi d'un approvisionnement d'eau pour la région agricole. Dans la plupart des aflaj, l'eau est d'abord dirigée vers les ménages privés pour satisfaire les demandes en eau potable. L'eau est alors conduite vers les mosquées, et finalement dans les bains publics où l'eau est nécessaire pour la lessive et autres tâches ménagères. Quand la demande domestique d'eau est satisfaite, l'eau des falaj est employée pour irriguer les palmiers dattiers permanents. Et, avec une moindre priorité la terre cultivée de façon saisonnière avec du blé, la tomate et l'oignon [Al-Ghafri, 2000]. Cet arrangement aide les fermiers à commander la sécheresse et garantit la production végétale de base. Sans compter que l'utilisation agricole et domestique, des systèmes d'aflaj sont également parfois employés pour des buts industriels et autres, comme pour les moulins à eau ou pour stocker l'eau pour des voyageurs [Costa . P.M,1987].

2.4.4 Administration de Falaj

Une grande administration typique des falaj Omani se compose d'un directeur (wakil) ;deux aides (arifs), un pour des services de sous terre-section et l'autre pour en haut services de terre-section ;un comptable (qabidh) ou administrateur (aldaftar);et un travailleur (bayadir)

[Sutton, S,1984].Selon la taille du système de falaj, l'aflaj peut avoir toute une administration de ce type. Mais une minorité d'entre elles, auront un wakil qui est élu par les propriétaires du falaj et nommé par le chef du village (cheikh).

En tant que directeur d'exécution, le wakil est responsable de la gestion globale de ce falaj tel que la distribution de l'eau, attribution de budget, résolution de conflit entre les fermiers, gestion des urgences.

Les arifs mettent en application les directives des wakil, dirigent les travailleurs et peuvent déterminer la synchronisation de l'irrigation. Sous la surveillance du directeur, le qabidh contrôle le revenu du falaj afin de faire une mises à jour pour rendre compte et préparer des rapports financiers annuels au propriétaire du falaj. Il arrive qu'une certaine partie de l'eau d'aflaj peut être louée à court ou à long terme. Ceci est effectué par le commissaire-priseur (dallal).

Si un conflit se produit, le wakil ou le propriétaire peut porter plainte au cheikh. Si le cheikh ne peut pas résoudre le problème, le cheikh lui-même se référera plus haut au gouverneur (wali) qui est le représentant du gouvernement et en mesure de s'adresser au juge (qadhi) pour prendre une décision finale.

Parfois le wakil ou le propriétaire réclame un comité d'audit pour vérifier le revenu financier et de dépense du falaj. Ce comité consiste habituellement de 3 à 4 administrateurs du village .[Al-Saleemi. M,1997].

2.4.5 Distribution De l'Eau Des Falaj

A Oman, la méthode d'assigner des mises en commun de l'eau entre des fermiers est complexe dans la plupart des aflaj d'Oman. L'eau est distribuée à la base à l'heure, mais l'attribution de l'eau basée sur le volume existe également dans quelques cas. Il y a quatre méthodes différentes pour faire l'attribution de l'eau

- **1^{er} méthode (méthode par intervalles)** : Dans quelques systèmes d'aflaj, le jour est divisé en des intervalles estimatifs, selon lesquels les fermiers partagent l'eau. Par exemple, le plein jour peut être divisé en sept intervalles, en utilisant des événements tels que l'aube, lever de soleil, midi, prière d'après-midi, coucher du soleil, prière de soirée et minuit. Cependant, cette méthode n'est pas très populaire parce que les unités de temps sont trop variables et peu claires, souvent ayant pour résultat le conflit entre les fermiers . [Al-Abri. B,1980].
- **Tasa** :Dans la partie nord de l'Oman une méthode différente et plus sophistiquée de la distribution de l'eau est employée. Le principe est très simple - une unité de part de l'eau (tasa)

est déterminé par le temps nécessaire à remplir un récipient avec de l'eau (fig.2.11). Chaque fermier obtiendra un multiple ou une division d'une tasa. Le volume de ce récipient change selon l'unité de temps.

- **Liggil:** Dans quelques régions d'Oman, habituellement dans les montagnes et particulièrement dans les petits systèmes de falaj. L'eau des falaj est stockés dans un grand réservoir d'eau (liggil). Après l'eau est alors distribué par le volume selon la taille du farmland(s) (les terres cultivées) . Dans ce cas le débit et les parts de terre sont petites [Al-Ghafri. A,2000].

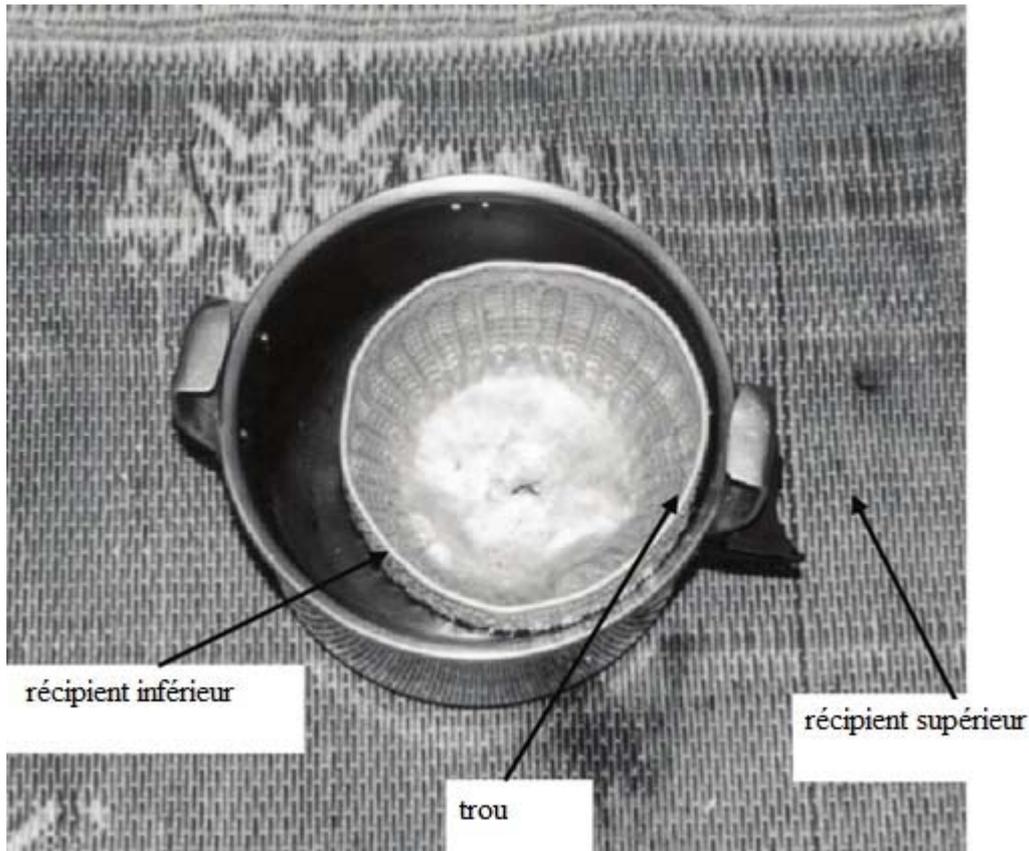


Fig.2.11. Tasa de falaj Saiq à Al Akhdhar de Jabal.

- **Athar:** Athar est généralement employé en tout de l'Oman nordique et central. C'est l'un des systèmes les plus compliqués pour assigner l'eau entre les utilisateurs. Le comité des fermiers décident d'établir une distribution des parts de l'eau de falaj entre les propriétaires de falaj. Afin d'étudier en détail le débit des écoulements, les fluctuations d'eau, le type de sol, nombre de propriétaires et leur contribution proportionnelle pendant la construction du falaj, la longueur du cycle d'irrigation (dawran). Ceci peut s'étendre sur 4 à 21 jours. En conséquence, plus le débit est inférieur, plus le dawran est court. Après que le dawran soit placé, la part de l'eau pour chaque fermier est employée pour déterminer une unité centrale de temps d'athar. Donc

pratiquement chaque plein jour se compose de 48 athars et deux baddas, un pour le jour et l'autre pour la nuit. Chaque athar est encore divisé en 24 qiyas, qui est pratiquement la plus petite unité de la part de l'eau et approximativement égale au temps requis pour irriguer un arbre de palmier dattier avec bon écoulement de falaj [Al-Ghafri. S, 1999]. Toutefois, d'autres unités existent, représentant différents cours du temps. Une fois que l'eau est divisée entre les actionnaires, cette distribution reste inchangeable et les parts de terre et d'eau sont hérités entre les membres des familles selon des règlements islamiques. Chaque fermier irriguera ses champs avec le même nombre d'athars à chaque dawran. [Norman.W. R,2000].



Fig.2.12. Division d'écoulement dans des systèmes d'aflaj.

3. LE SYSTEME DE FOGGARA EN AFRIQUE

Afrique, Le système de captage a été utilisé en Egypte (il a fonctionné pendant 7 siècles avant J.-C.) dans les oasis du désert Libyque, à *Baharia* et *Farafrah*, des foggaras d'une construction soignée et d'une technique savante. On a signalé la présence de galeries souterraines au Fezzan. Des travaux du même genre existent à Sidi-Maâbed près de Ghadamès.

Dans le Sud tunisien, des ouvrages comparables aux foggaras existent à Menchia dans le Nefzoua, ainsi que dans l'oasis d'El-Guetar où ils portent le nom de « ngoula » ou « *kriga* »

3.1. Système de *khettara* en maroc

3.1.1. *Naissance et évolution de système*

Au Maroc, à Marrakech, les premières *khettaras* sont mises en place au XII^e siècle) et que des *khettaras* ont été encore creusées jusqu'en 1950. Mais, dans la deuxième moitié du XX^e siècle, la modernisation de l'hydraulique publique et l'essor de forages privés ont fragilisé les *khettaras* et un grand nombre de galeries sont aujourd'hui hors service. Or, c'est précisément dans le Tafilalet que les oasiens ont le mieux conservé ces ouvrages. La *khettara Lahloua* est l'une des 250 *khettaras* encore en activité à ce jour, sur les 450 qui ont été recensées dans la Province du Tafilalet (région de Meknès, Maroc).

3.1.2. *Principe de fonctionnement du système*

Le principe de construction consiste à intercepter la nappe phréatique qui affleure au piémont d'un relief, en creusant une galerie presque horizontale de l'aval vers l'amont – jusqu'au « puits mère » – avec une pente inférieure à celle de la topographie (voir Fig.2.13) afin d'amener par gravité l'eau des nappes souterraines à la surface pour irriguer les vergers et les jardins maraîchers. Les puits successifs d'évacuation des déblais Fig.2.14 sont les seuls signes visibles de ces ouvrages ayant exigé des travaux considérables impliquant toute une collectivité. Ces puits servent ensuite d'accès pour l'entretien des galeries. Dans la zone oasienne de Tafilalet, les galeries font 5 à 10 kilomètres de long et les puits, distants de 30 m environ, et ont des profondeurs allant de 2 à 18 mètres, la galerie en elle même fait 2 à 4 m de profondeur et moins de 50 cm de largeur. Le dernier puits creusé, dit puits de la source, est appelé le Jbaa. Chaque *khettara* a un chef, responsable du partage de l'eau.[IRD,2007].

CONCLUSION

Dans les régions arides la vie très rude sans la présence de l'eau de précipitation ou de surface. La collecte et la distribution des eaux dans ces régions dépend du système utilisé. Le système souterrain *qanat* est l'un de ces systèmes qui existe dans de nombreux endroits dans le monde: Afghanistan, Chine, Irak, Iran, les pays du golfe Persique, la Jordanie, la Syrie, Chypre, l'Afrique du Nord, l'Espagne, Sahara, le Japon, le Yémen, et dans les Amériques du sud. Quelque deux variantes douzaine de noms de ces systèmes existent, y compris *qanat*; *karez* (sud-ouest de l'Asie); *khattara* (Afrique du Nord), et *falaj* (Arabie). En Algérie la foggara est très implantée au sud algérien et conçue avec les mêmes techniques que décrites dans les autres régions du monde. Et sera décrite dans le chapitre suivant.

INTRODUCTION

Plusieurs méthodes permettent de collecter le maximum d'eau disponible pour l'irrigation. La technique traditionnelle de captage des eaux souterraines fait converger à partir d'une foggara, vers l'oasis, de faibles quantités d'eau drainées de couches géologiques aquifères (grès). Le produit de ce réseau de drainage (foggara dans le Sahara,) est acheminé, par gravité, au bord d'une dépression dont le versant accueille l'oasis dans les régions de Tout, de Gourara et de Tidikelt (Wilaya d'Adrar, Algérie).

1. NOTION SUR LE SYSTEME DE FOGGARA (TOUAT, GOURARA, ET TIDIKELT)

1.1. Définition du système :

Le terme "*foggara*" désigne une canalisation d'eau souterraine. Le mode de captage varie suivant l'origine des eaux. Simple aqueduc dans certains pays, elle représente au Sahara algérien tout un système de drainage souterrain des nappes aquifères. Etymologiquement, il semblerait que le mot provient du verbe arabe « *fequer* » qui a deux sens : creuser, être pauvre. Certains auteurs y verraient l'étymologie de l'adjectif « *mofgour* » qui veut dire éventrée. Quoiqu'il en soit « foggara » apparaîtrait comme une forme d'intensité populaire de "*Fogra*". [Kobori I,1982].

1.2. Conditions d'invention du système

D'une façon générale, l'adoption de ce procédé paraît déterminée par des considérations de niveau de nappe, de climat et de conditions topographiques. La foggara suppose un terrain à irriguer situé en contrebas de la surface d'alimentation de la galerie souterraine. Ce qui explique que la plupart des oasis soient adossées à la falaise terminale d'un plateau. D'autre part, l'un des avantages qui peuvent faire préférer la foggara à tout autre mode de captage ou d'adduction est qu'elle assure simultanément une fonction de drainage et d'adduction et une protection contre l'évaporation.

La distribution géographique de ce mode d'irrigation correspond aux régions des plateaux désertiques et subdésertiques. Ainsi on peut on noter la présence des foggaras de l'un à l'autre bout de la bande de régions sèches qui s'intercalent, dans l'ancien continent entre la zone tempérée et la zone tropicale [Savornin ,1947] .

2. NAISSANCE ET ORIGINE DU SYSTEME DE FOGGARA

L'utilisation du kanât ou de la foggara est très ancienne et son origine est orientale. Les Assyriens et les perses l'ont connue. le principe. La foggara du Sahara algérien est-elle venue directement de l'Est avec les migrations arabes ou bien a-t-elle pénétré par la voie marocaine ? Les chroniqueurs arabes du Touat et du Tidikelt prétendent que la foggara est une « invention » qui est venue de Marrakech. Ce serait alors en relation avec le texte d'EL-Idrissi, très souvent cité (VIe siècle de l'ère hégirienne) et le plus ancien, attestant que la « chose », sinon le nom, était connu.

Kanat, foggara, khattara, désignent sous des vocables différents la même chose, ce procédé ingénieux par lequel les populations du désert ont essayé de parer à l'insuffisance de la nature.

La foggara est la dernière née dans la langue arabe, elle est aussi la deuxième venue en Afrique du Nord. Elle est le fait de sédentaires. Ce sont les tribus d'invasion qui ont amené la pratique perfectionnée de l'utilisation des eaux souterraines. Il serait intéressant de connaître par qui la foggara a été introduite au Sahara. Il existe bien au Touat, en particulier, des chroniques locales, dont la récitation par cœur est réservée à une minorité d'initiés.[A. Saïd, 1983].

D'après l'auteur ou les auteurs des recueils « *saheb elauzil* », « *echraa el bassiti* », « *insaf el missoure* » la construction de foggaras dans le Touat serait antérieure à la fin du première siècle de l'Hégire.

Dans le "*Echraâ el Bassiti*" de son auteur *Baba hyda* région de Tamentit, il est dit que le premier homme qui a creusé une foggara à Tamentit (Touat) était le nommé « *El Malik el Mançour* », qui craignant d'être poursuivi par un Roi ennemi, chercha refuge dans le Ksar isolé, alors qu'il était en fuite vers le Soudan. *El Mançour* venait du village d'El Kouine, de la Régence égyptienne, et était passé par l'Andalousie. A son arrivé à Tamentit où il pensait qu'il pourrait vivre en paix dans ce centre où l'eau jaillissait. Il entreprit la création de la foggara qu'il appela « *hennou* ». Les foggaras se multiplièrent par la suite et atteignirent en l'an 300 de l'Hégire le nombre de 360. A partir de cette époque, les foggaras se généralisèrent dans tout le Touat.

L'auteur de "*l'Insaf el Missoure*" dit qu'il était de passage aux environs de Marrakech ou Tlemcen où il a rencontré un nommé *Yaoumara* parmi les "Arabes bruns". Celui-ci avait creusé des puits communiquant entre eux.

Ibn Khaldoun, signalant Tamentit, mentionne ce pays saharien où disait-il « l'eau coule à la surface du sol d'une manière étrange introuvable dans le Tell du Maghreb ».

Une chronique locale (écrite au début du XVIIe siècle par *El Tinilani*), raconte la « fuite d'une foule d'arabes après la destruction du gouvernement dans le Maghreb; ils s'installèrent au Touat où ils trouvèrent refuge. Ils entreprirent des travaux d'irrigation au moyen de canaux souterrains, tels que n'en avaient jamais établi de semblables les populations qui les avaient précédées ; ces canaux furent nommés « foggaras ».

Comme on le voit, ces chroniques sont sujettes caution. Cependant de nombreux écrits sembleraient concorder sur ce point : la foggara a été introduite par les arabes, au Touat. On peut donc placer approximativement l'introduction de la foggara entre le Xe et le XIe siècles. [Nesson ,1973].

3. NAISSANCE ET EVOLUTION DE LA FOGGARAS

Nous avons vu que les foggaras se situent dans le Sahara algérien à la périphérie du plateau du Tademaït. Les conditions d'installation y sont en effet particulièrement bien réalisées : Eau de la nappe des grès albiens, existence de dépressions naturelles où pourront s'installer les palmeraies (ce qui permettra l'écoulement de l'eau), et enfin, la présence de la main-d'œuvre ou possibilité de son recrutement.

El Idrisi décrit la naissance d'une foggara à Marrakech. Il semble dire qu'elle s'est développée d'amont en aval. Au Sahara, les foggaras sont relativement longues, elles vont capter l'eau des grès albiens à des distances qui varient entre 3 et 12 km. [Nesson ,1973].

La dénivellation entre les affleurements gréseux et les dépressions est parfois assez faible. Toute la difficulté du problème consiste à trouver l'eau souterraine et à l'amener à l'air libre au niveau des jardins. Penser que la foggara s'est développée de haut en bas, serait résoudre le problème par l'absurde. Il faudrait admettre à priori que l'eau captée à plusieurs kilomètres en amont, pourra être dirigée au niveau voulu par une galerie souterraine, et suivant une pente

insignifiante. Malgré l'excellente pratique que pouvaient avoir les artisans de la foggara, ils ne pouvaient pas à priori déterminer le niveau hydrostatique de l'eau.

Il semble bien qu'on puisse affirmer que la foggara est développée d'aval en amont. Elle a son point d'origine dans une source. Celle-ci a pu se tarir ou bien les utilisateurs ont voulu augmenter le débit. Une tranchée a été alors pratiquée dans la nappe aquifère. Cette tranchée, établie dans le sens d'écoulement de la nappe en partie de bas en haut. L'approfondissement progressif de la tranchée, la difficulté d'évacuer les déblais et la possibilité de construire un tunnel dans la couche consistante des grès ont conduit au puits. Le puisatier s'est alors transporté à la surface du sol, a creusé jusqu'à la nappe et a relié ces différents puits par une galerie souterraine.

Le débit de la foggara dépend de la surface drainée par la captation, il est donc conditionné par la longueur du drain. Aussi, dès son entrée dans la nappe aquifère, l'artisan multiplierait-il les puits suivant un tracé rectiligne, car il s'enfoncé davantage dans les grès aquifères. Par ailleurs, il ne peut pas développer son ouvrage latéralement, limité qu'il est par l'action des voisins (dès le début, une réglementation a fixé l'intervalle minimum qui devait séparer les foggaras les unes des autres 100 m environ). [Capitaine Lô, 1953].

3.1 La localisation des foggaras d'Adrar .

La localisation de la foggara obéit à des conditions topographiques et hydrogéologiques précises : Il faut d'une part que l'eau soit présente dans le sous-sol à une profondeur qui ne dépasse pas quelques dizaines de mètres (pour les plus longues des foggaras, les puits amont atteignent plus de 40 m), habituellement moins. Et d'autre part, et surtout que les terroirs à irriguer puissent être aménagés en contrebas du débouché de la foggara. C'est la raison pour laquelle les oasis à foggaras s'alignent à la limite inférieure d'un glacis, cas du Gourara, du Touat et du Tidikelt, ou sur un piémont comme au Sahara marocain, ou encore sur la terrasse, ou les alluvions aréniques, d'un oued épousant une pente notable, comme dans les vallées de l'Ahaggar. Le schéma suivant représente la localisation des foggaras dans le Sahara algérien. [ARRUS.R, (1985)].

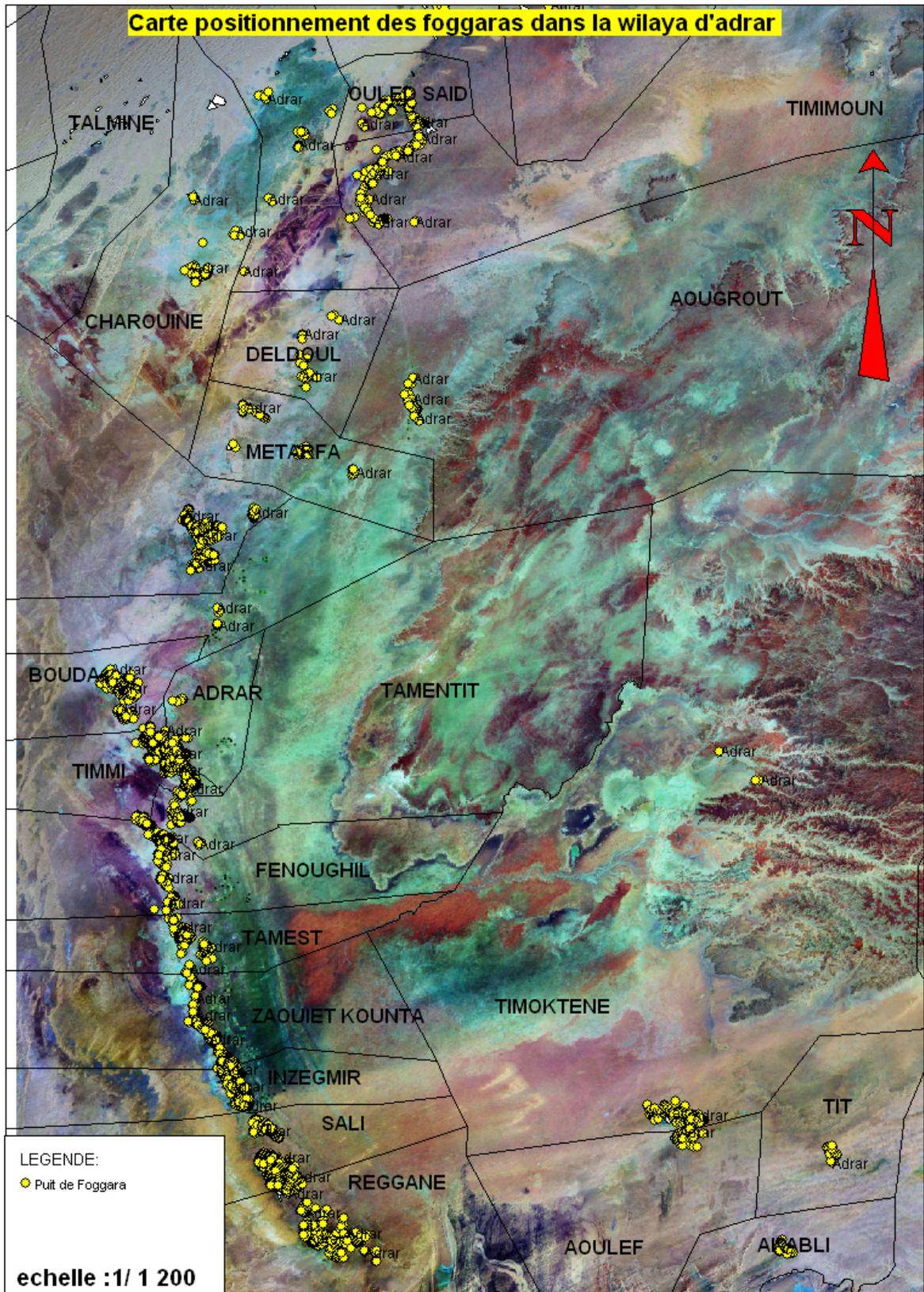


Fig.3.1. Photo satellite de localisation des foggaras du Sahara Algérien A.N.R.H_2010

CARTE DE POSITIONNEMENT DES FOGGARAS DE TAMENTIT

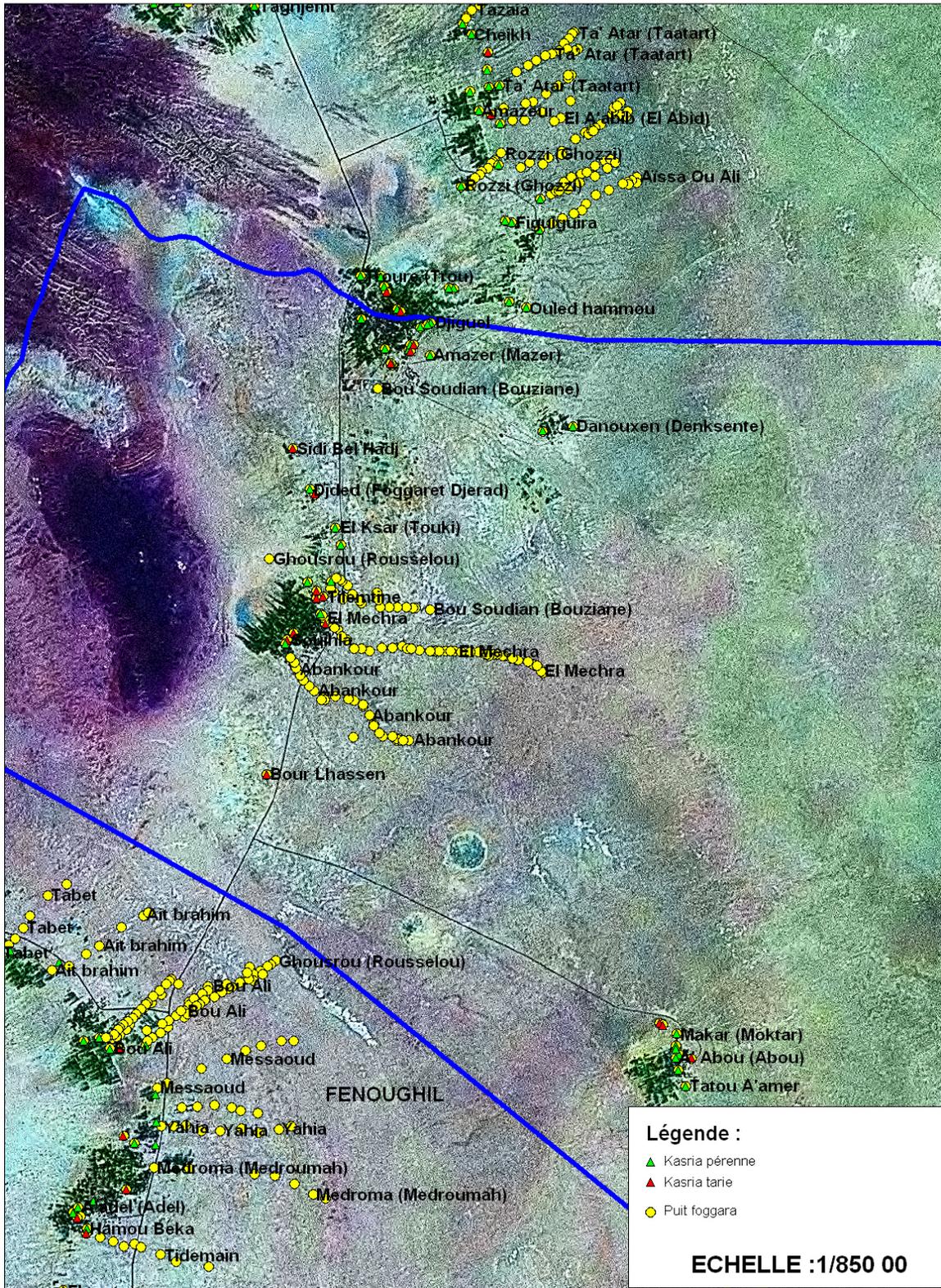


Fig.3.2. Carte de positionnement des foggaras de Tamentit A.N.R.H_2010

4. L'EVOLUTION DES FOGGARAS.

La foggara est née, l'eau parvient dans les jardins. Son évolution dans le temps est dictée par l'augmentation des besoins en eau et l'extension des cultures. On tend à ce moment-là à multiplier les puits. Mais la progression est limitée par la falaise terminale du plateau, par ailleurs les difficultés augmentent avec la profondeur croissante des puits. Le puisatier essaiera alors d'approfondir le drain où suinte l'eau des grès.

Là aussi la difficulté consiste à maintenir une pente suffisante afin d'obtenir l'écoulement de l'eau. Parallèlement, et c'est un fait, l'appauvrissement de la nappe vient compliquer considérablement la situation. On se trouve alors placé dans l'alternative suivante :

- Approfondir la foggara et déplacer en conséquence quand la chose est possible, les jardins vers le bas de la dépression.
- Ou bien abandonner la foggara et elle morte. Dans les régions du Touat, Gourara, Tidikelt certaines foggaras présentent, quand on suit leurs parcours souterrains, plusieurs galeries superposées.

En surface, on observe des vestiges des jardins abandonnés qui correspondent au niveau d'irrigation des différentes galeries. La palmeraie se déplace et suit les mouvements de l'eau. Mais il y a des cas où les jardins ne peuvent plus émigrer dans la dépression. Les bassins collecteurs finissent alors par se trouver au-dessous du niveau des jardins et l'irrigation se fait par puisage.[Capitaine Lô. 1953].

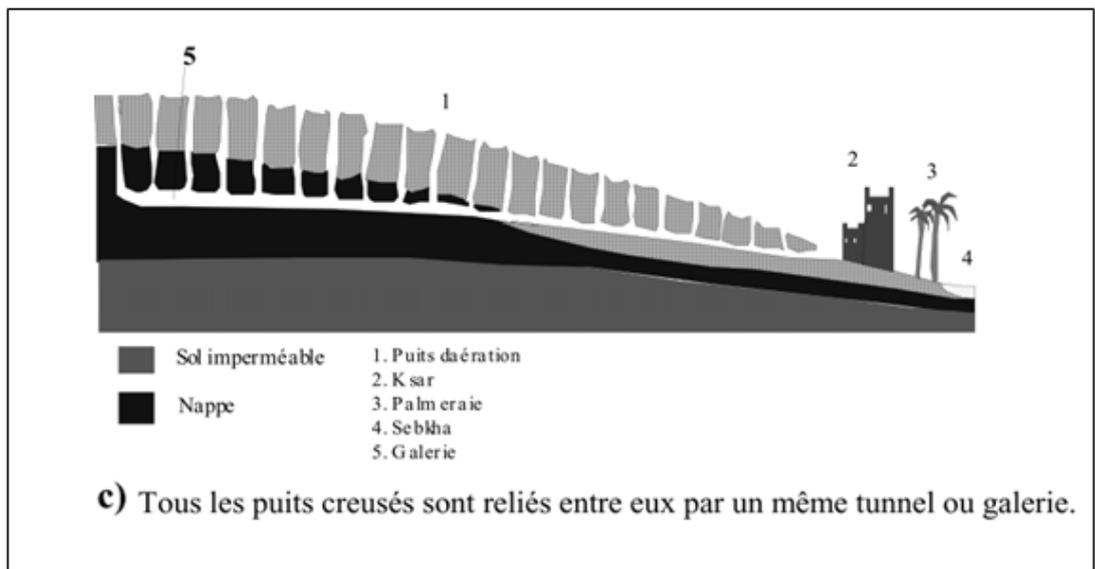
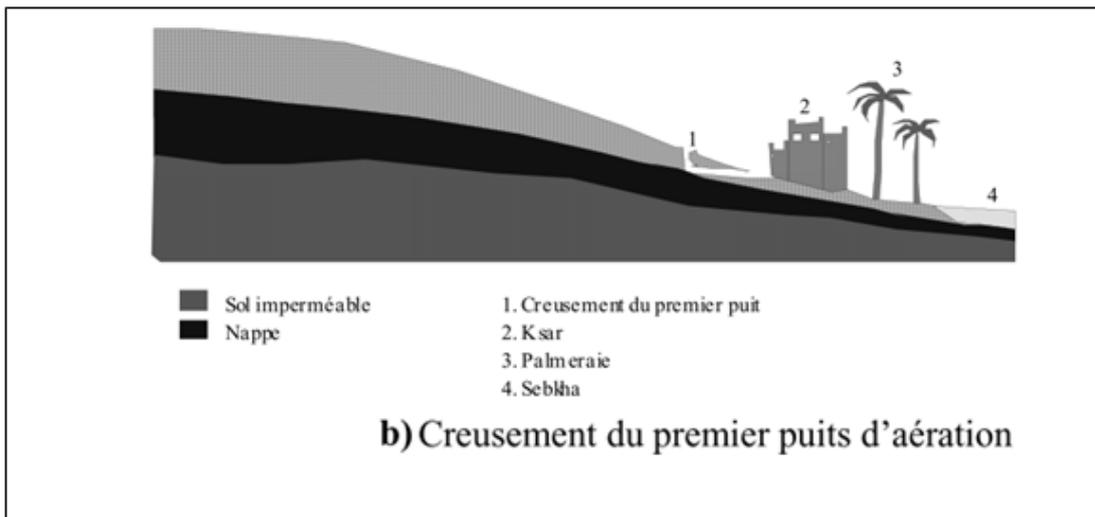
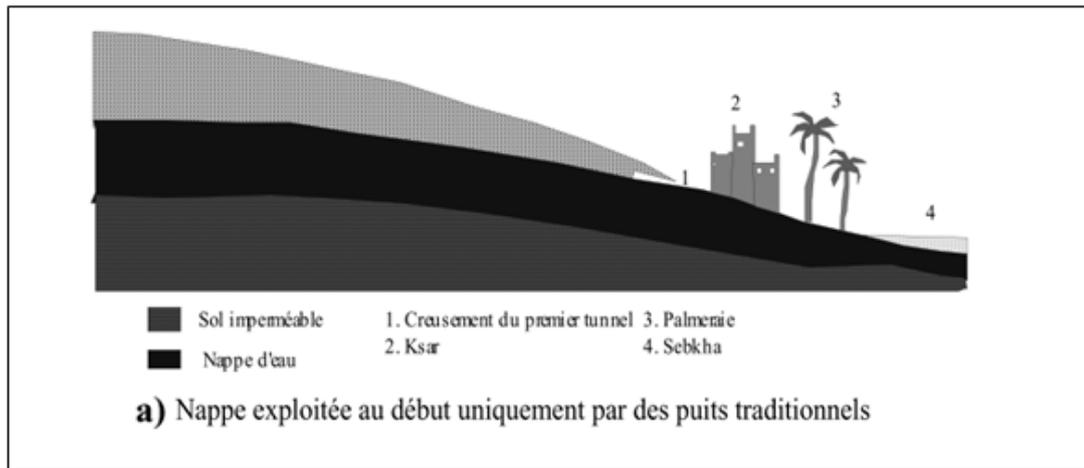


Fig.3.3. Coupe de l'évolution des foggaras Remini_2008 modifier par_Slimani_S

5. DESCRIPTION DE LA FOGGARA

Une foggara se compose, dans l'ensemble, en deux parties la première est la partie drainante qui est composée de puits en nombre plus ou moins important, de profondeur variable, réunis à leur base par une galerie dont le tracé est extrêmement sinueux

5.1.puits

La distance qui sépare les puits entre eux n'est pas constante ; elle varie entre 10 et 60 m. Ces puits ne jouent aucun rôle dans la production de la foggara, et ils n'ont été creusés que pour permettre l'évacuation des déblais lors de son creusement et le nettoyage de l'ouvrage.

L'alignement relatif des puits à la surface du sol, suppose un tracé sensiblement rectiligne pour la galerie. En réalité, celui-ci est extrêmement capricieux, disposition qui s'explique par la technique employée par les *ksouriens* pour le creusement : dans la plupart des cas, une "*khechba*" (tronc de palmier coupé en quatre dans le sens de la longueur) est placée sur la bouche du puits, alignée en surface avec l'ouvrage suivant ; au fond, les ouvriers reprennent cet alignement pour le donner à la galerie.

Si l'on considère que la verticalité des puits est loin d'être parfaite, et que leur diamètre est petit (0.80 à 1 m), on comprend aisément le tracé fantaisiste donné au conduit. Parfois, on laisse pendre deux ficelles fixées aux extrémités de la *khechba* ; deux pierres y sont attachées pour les tendre, et l'alignement ainsi concrétisé, les ouvriers s'efforcent de le suivre.

Comme nous l'avons dit, les puits ne sont forés que pour permettre l'évacuation des déblais et le curage de la foggara. Ils représentent donc un très gros travail qui n'apportera rien de plus au débit de la foggara. Leur profondeur est très variable, rarement inférieure à 1 m, pouvant parfois atteindre 40 m. Ils sont creusés jusqu'à la nappe et le forage cesse dès qu'ils atteignent l'eau ; on procède ensuite au creusement de la galerie qui les réunira aux précédents

Leur verticalité est très relative, ainsi d'ailleurs que leur forme et leur diamètre ; ils sont très rarement circulaires (de 0.50 à 1m). Des encoches profondes d'une dizaine de centimètres s'étagent sur toute leur hauteur creusée dans les parois, diamétralement opposées, et servant à la descente et à la remontée des ouvriers. Leur orifice extérieur est entouré par tous les déblais résultant de leur creusement et de celui de la galerie. Ces déblais accumulés en forme de cône produisent l'impression d'une taupinière. Pour éviter la pénétration du sable dans l'ouvrage,

tous les orifices sont obturés par quelques pierres plates jointes à de l'argile, donnant un bouchon suffisamment étanche.(fig.3.4)



Fig.3.4. Taupinières de puits de foggaras le long de la route Adrar Reggane

Photo Benziada.S_ 1997



Fig.3.5. Vue en haut d'un puits_photo Slimani _S _2006 Tamentit

5.2.Galerie

La galerie souterraine a une longueur rarement inférieure à une centaine de mètres et très souvent supérieure à 7 ou 8 Km. La moyenne de ces ouvrages est de l'ordre de 2,5 Km, ce qui donne des foggaras dans l'ensemble assez importantes. La galerie réunissant les puits en profondeur est la partie drainante de la foggara. Sa largeur varie entre 0.5 et 1.50 m, mais reste le plus souvent en dessous de 0.75 m. Comme les puits, elle est très irrégulière, et présente une succession d'étranglements et d'élargissements, au gré des roches traversées. Sa hauteur est très variable, parfois elle oblige à ramper dans l'eau pour circuler alors que plus loin elle peut être supérieure 2 m.



Fig.3.6. Galerie avant la sortie d'une foggara Photo Slimani_ S_ 2006

Les parois de la galerie sont fréquemment recouvertes d'une croûte de plusieurs millimètres d'épaisseur, d'un blanc jaunâtre. Il est rare de voir l'eau suinter des parois de la galerie, cependant quelques fissures le permettent quelque fois. La chaleur qui règne dans les conduites, le degré hydrométrique voisin de la saturation, rend le travail et même la moindre activité extrêmement pénibles. L'eau s'écoule très lentement car la pente est extrêmement faible, de l'ordre de 1 mm par mètre, ce qui explique la difficulté d'entretien en cas d'éboulement. De cette disposition, il résulte que les ouvrages prenant la nappe "par les cheveux" doivent être très longs pour obtenir des débits assez conséquents. Le débit est très variable d'une foggara à l'autre. Il varie de quelques dixièmes de litre une dizaine de litres la seconde.

Le manque de pente dans la galerie a pour conséquence que le moindre éboulement qui se produit dans le canal provoque une retenue d'eau se répercutant très en amont d'où la nécessité, pour la bonne marche de l'ouvrage, de pratiquer des curages très fréquents. Pour donner une pente assez uniforme à la galerie et pour qu'elle soit faible, les ouvriers la creusent en remontant le courant d'aval en amont en s'efforçant de conserver partout la même profondeur uniforme. On notera qu'avec un tel procédé, les pentes obtenues sont très régulières.[Paix , 1959].

Le curage des galeries se fait assez souvent pour les foggaras importantes (annuellement par centaines), malheureusement beaucoup restent à l'abandon, et s'encrassant progressivement en finissant par s'assécher. Il en est de nombreux *Ksours* où les ouvrages ne sont plus entretenus. La raison en est l'absence de travaux et le manque de main-d'œuvre dans le pays.[Orengo , 1951].

5.3.Les ouvrages hydrauliques de la foggara

Pour répartir l'eau issue de la foggara, les oasiens du Timimoun et Adrar ont mis au point un système aussi efficace qu'esthétique : les peignes (*kesria*). Un spécialiste, le Kiel el ma, mesure le débit qui passe entre chaque dent et refait l'opération chaque fois que la foggara est recreusée ou entretenue ou quand un propriétaire terrien achète le droit à l'eau à un autre propriétaire.

5.3.1. La kasria principale

A la sortie de la foggara, l'eau est divisée par un peigne en pierre tendre et facile à gratter : c'est la *kasria principale*. Cette dernière doit avoir un nombre suffisant d'ouvertures d'où l'eau s'échappe facilement sans faire de retour en arrière. Ces ouvertures permettent à l'eau de couler dans des rigoles ou canaux qui peuvent être à nouveau divisés par un autre peigne et ainsi de suite dans toutes les directions vers les palmeraies.

La kasria principale représente un bassin en forme triangulaire barré par un grand peigne ou partiteur principal, jouant le rôle de stabilisateur d'eau. Cette technique consiste à calmer l'eau avant sa répartition, c'est une sorte d'ouvrage tranquillisateur. Elle reçoit la totalité du débit de la foggara appelé aussi la *kasria-lak'bira*.

Cette dernière répartit le débit de la foggara généralement en trois, quatre ou cinq grandes rigoles qui sont des (*mjara*) au singulier (*majra*). A partir de ce bassin, les canaux vont en éventail dans tous les sens vers les parcelles à irriguer. Au bout de ces *mjara* d'autres *kasria* secondaires répartissent les eaux.



Fig.3.7. Peigne (kasria) de répartition (Slimani_S _2007)

5.3.2. *La kasria secondaire*

C'est un nouveau bassin aussi important, on le retrouve après le premier, ce bassin caractérise un partage familial de chaque tribu ou groupe participant à la réalisation de la foggara.



Fig.3.8. Kasria secondaire(Slimani_S _2007)

5.3.3. *La kasria tertiaire*

D'autres kasrias minimales se trouvent tout le long des différents parcours suivant la nécessité. Ces kasrias viennent après la répartition secondaire, ils conduisent l'eau vers les madjens.



Fig.3.9. Kasria plus petite (tertiaire) (Slimani_S _2007)

L'eau circule ensuite dans des canaux, les seguias, et arrive aux bassins : les *madjens*, où elle s'accumule et sera utilisée par les cultivateurs pour irriguer les cultures des jardins.

5.3.4. *Le Madjen*

C'est un bassin de récupération et de régularisation peu profond et rectangulaire qui se trouve à l'endroit le plus haut du jardin et où l'eau s'accumule pendant vingt quatre heures. L'irrigation se fait en général le matin de bonne heure en été et dans la grande matinée en hiver. Chaque jardin possède un *madjen* construit en argile ou en béton afin d'éviter une déperdition inutile dans des irrigations en surplus. [Savornin,1947].



Fig.3.10. Madjen en argile (Photo Ansari .T_2006)

5.3.5. Les Seguias

La Seguia qui désigne un canal à ciel ouvert de section rectangulaire ou circulaire est construite généralement en terre. Une quantité appréciable d'eau est perdue par infiltration et par évaporation. Les oasiens ont été encouragés à construire des Seguias en ciment pour réduire les infiltrations, mais cette solution a provoqué le dessèchement de certains palmiers implantés près de ces Seguias. Les canaux drainent l'eau de la *kasria labkira* jusqu'au Madjen, puis du *Madjen* jusqu'au *Gamoun*. Dès que l'on se rapproche des jardins, les Seguias se multiplient et prennent diverses directions, sans toutefois qu'elles se recoupent entre elles. Cet enchevêtrement de Seguias provoque une fraîcheur remarquable dans toute la palmeraie (microclimat oasien). Toutes les Seguias situées dans les ruelles sont frontales



Fig.3.11. Photo montre l'irrigation des gamoun dans le jardin Ansari .T_2006



Fig.3.12. Les Seguias Photo Ansari .T_2006

CONCLUSION

La succession des oasis sahariennes sont pérennes dans l'espace et dans le temps. Par le fonctionnement permanent des foggara fonction . Les auteurs des recueils mentionnent que la naissance de ce système dans La région du Touat, du Gourara, et du Tidikelt serait antérieure au début de onzième siècle. En effet le système de foggara est basé sur des techniques locales spéciales qui contrôlent toutes les applications relatives à ce système.

INTRODUCTION

La foggara est une galerie drainante creusée en ligne droite de l'amont en aval. Elle capte et amène de l'eau souterraine vers le terrain à irriguer, et ce grâce à une pente appropriée. L'arrosage se fait par écoulement gravitaire, il est favorisé par les conditions topographiques favorables, dont le niveau du sol est inférieur au niveau piézométrique de la nappe du continental intercalaire. La distribution de l'eau s'effectue à partir de systèmes de répartition, d'emménagement et de conduits appropriés. L'ensemble des techniques constructives et principes de fonctionnement sera décrit et étudié le long de cette partie.

1 .PRINCIPE DE LA FONCTIONNEMENT DU SYSTEME DE FOGGARA

Le fonctionnement général de la foggara répond au schéma suivant (fig.4.1). Dans la partie amont entre les points D et F la galerie pénètre sous la surface de la nappe phréatique et la draine, tandis que la partie aval, entre les points D et B permet, grâce à une légère pente, permet l'écoulement des eaux vers la surface du sol. Pour que la création d'une foggara soit possible, il est nécessaire donc que la nappe phréatique soit à une cote supérieure à celle des jardins à irriguer. Cette condition est généralement remplie quand une région plate est drainée par un système de dépression (oueds ou sebkhas) qui provoque un rabattement important de la nappe. C'est bien le cas du Touat, du Gourara et du Tidikelt où la dépression, formant gouttière s'étend sur près de 400 Km.

La direction des foggaras est donc indépendante du pendage des couches ; elle ne dépend que de la topographie locale. Elle est toujours parallèle à la direction d'écoulement de la nappe au contraire d'une galerie drainante logiquement tracée. Le drainage, effectué par les premières longueurs de tranchées, puis de galeries a provoqué un rabattement de la nappe et une migration du point D vers le point F. Il finit par y avoir une stabilisation du point D à partir du moment où le débit drainé est égal au flux de débit affluent.

Toute augmentation du débit ne peut se faire qu'en prolongeant vers l'amont la tête (point F) de la galerie, mais si le débit prélevé est supérieur au flux de débit, la migration du point D vers le point F se poursuit, avec au bout d'un certain temps, une baisse du débit. Autrement dit, le débit supplémentaire prélevé pendant un certain temps l'a été au détriment de la réserve. Souvent pour faire remonter le débit on creuse des galeries secondaires. Bien mieux, la migration du point D vers le point F de la foggara a allongé la partie non active de la

foggara et dans cette partie l'eau drainée se perd par infiltration. Cette infiltration est encore favorisée par tout obstacle gênant la libre circulation de l'eau dans la galerie entre B et C. On s'accorde généralement à estimer que la fraction des débits ainsi perdus représente 10 à 20 % du total drainé. Ce sont des débits que les foggaras « basses », calées à un niveau inférieur à celui des foggaras principales, recueillent. La réputation d'ancienneté des foggaras n'est donc justifiée que pour la partie avale. Les travaux d'allongement sont exécutés au fil des siècles. Mais, par suite de la pente du terrain, la profondeur des puits de travail est devenue de plus en plus grande au fur et à mesure de l'allongement des foggaras et évidemment le rendement de travail de moins en moins intéressant. C'est ainsi que l'allongement des grandes foggaras de Timimoun exige actuellement le forage de puits de 40 m de profondeur pour 10 m de galerie drainante .

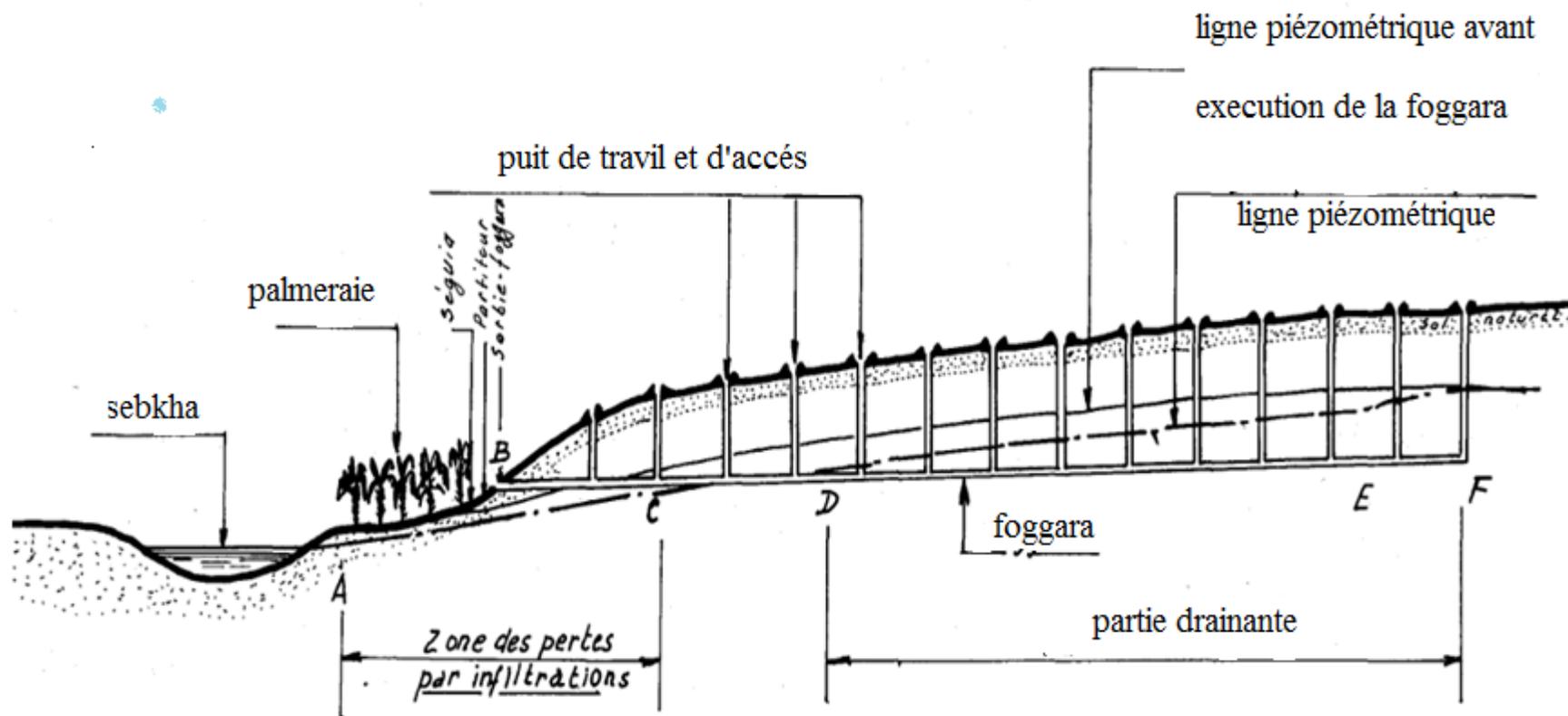


Fig.4.1. Schéma de fonctionnement d'une foggara d'après A.Said 1983

2. REPARTITION DE L'EAU DES FOGGARAS ET L'ART DU PARTAGE.

L'établissement d'une foggara est essentiellement une œuvre collective. Il est extrêmement rare et tout à fait anormal qu'une foggara soit la propriété d'un seul individu. Chacune d'elle appartient à un groupe de propriétaires. Ce régime de la copropriété pose le problème de la répartition de l'eau. La façon dont s'opère cette répartition n'est pas d'une moindre originalité que le procédé de captage lui-même. En faisant abstraction de certaines particularités locales, dans le Touat, Gourara et le Tidikelt, les choses se déroulent généralement comme suit:

Avant tout partage de l'eau, parfois même avant que les travaux de fouille soient terminés, tous ceux qui ont participé à l'établissement de la foggara soit par leur travail, soit par leur capitaux, procèdent à une première répartition purement théorique. On fixe pour chacun une part proportionnelle à son apport. Le débit est divisé à cet effet en un certain nombre de parties appelées « *guesmas* », chaque *guesma* se subdivise en « *maajens* » qui se subdivisent elles-mêmes en unités plus petites appelées suivant les régions « *habba cerira* » ou « *kira cerira* ». Au Touat toute foggara, quel qu'en soit le débit se divise initialement en 24 *guesmas*. La *guesma* renferme un certain nombre variable de *maajens* et enfin le *maajen* se subdivise en 24 « *habba cerira* ».

Ce partage est consigné dans un écrit spécial appelé « registre de la foggara » « *zmam el foggara* », qui est essentiellement la liste nominative des propriétaires d'eau avec l'indication de leur part. Cette liste est tenue à jour, et tient compte des mutations de propriétés par des témoins, sachant lire et écrire l'arabe, les « *chahed* ». Les répartitions d'eau nécessitent des opérations équivalentes à la règle de trois, mais celles-ci étant absolument inconnues chez les oasisiens, ils doivent pour arriver aux résultats utiliser des méthodes très compliquées. Il est inutile de préciser que pour la majeure partie des ksours, une seule personne est capable de faire des calculs. Dans les grands oasis comme Timimoun, il y en a cependant trois ou quatre. On les appelle « *hasseb* » comptable, ou « *amin* », homme de confiance. C'est une véritable charge que les responsables lèguent à leurs enfants.

On voit que dans cette région où l'eau est la base de la propriété, les *ksouriens* ont su établir un véritable état-civil de la propriété, institution d'un régime foncier savant et évolué, qui remonte à un passé assurément fort éloigné. Toute mesure ou répartition s'accompagne d'une inscription dans un ou des registres spéciaux affectés aux partages, achats et ventes d'eau. La part de chacun étant ainsi déterminé, on procède, la foggara achevée, au partage du débit obtenu. C'est ici qu'apparaît toute la singularité des méthodes locales. Alors que la répartition par temps « *nouba* » (littéralement tour d'eau) prévaut dans toutes les autres oasis du Sahara

algérien, les habitants du Touat, du Gourara et du Tidikelt ont adopté la répartition en “volume”.

La première opération est la mesure du débit de la foggara. Elle s’effectue non seulement lors du premier établissement de la foggara, mais lorsque le débit initial se modifie, soit qu’il ait été réduit par des éboulements de la galerie, soit qu’il ait été, au contraire, augmenté à la suite de travaux de réfection ou d’extension. Parfois même, elle est faite à intervalles réguliers. C’est donc une opération relativement fréquente que toute personne séjournant un certain temps dans ces régions peut avoir l’occasion d’observer.

Elle est dirigée par une sorte de spécialité, « *le Kiel el ma* », mesureur d’eau ; nommé par la djemaa du ksar en considération de ses connaissances et de son intégrité. La charge du “Kiel el ma” passe souvent de père en fils. Bien qu’elle soit le plus souvent confiée à des personnes sans considérations de classes ou de castes, une grande considération s’y attache. Cette considération est d’autant plus grande que le “*Kiel el ma*”, n’est pas seulement un expert hydraulicien, mais aussi une espèce de juriste que l’on consulte sur les cas difficiles et auquel on a recours lorsque surgit une contestation.

L’instrument de mesure porte le nom de « *chekfa* » dans le Tidikelt ; Touat, ou “ « *helfa* » (littéralement “celle par laquelle on jure), communément appelée de même « *el kiel el asfar* » “*le mesureur jaune*”. [A. Saïd, 1983].

3. DEFINITION DE LA CHEKFA

C’est une plaque de cuivre à faible épaisseur qui varie entre 1 à 2 mm, il existe deux formes dans la région d’Adrar, recourbées en cylindre au Tidikelt, rectangulaires et planes au Touat et au Gourara. L’homme qui confectionne la *chekfa* utilise une méthode particulière et précise. En premier lieu, il perce la plaque qui constituera la *chekfa* à l’aide d’un outil en acier appelé *elmatkoube*. Il réalise ainsi une rangée de trous de différents diamètres. Ils correspondent à l’unité de débit ainsi qu’à des multiples et sous multiples de cette unité. L’unité généralement employée est la « *habba* » ou, plus exactement, la “*habba kébira*”, qui correspond en moyenne au débit fourni par une ouverture qui varie entre l’intervalle de 8 mm et 11mm de diamètre. Cela dépend de la région et du débit qui s’écoule après le « *nouba* ». Cette dernière est une opération collective qui demande la participation des tous les propriétaires d’une foggara pour creuser les puits, les galeries ainsi que les travaux de dessablement et toute action qui a pour but d’augmenter la quantité d’eau dans la foggara. L’augmentation de débit obtenu définit la « *habba zerig* ». En fait, la *habba zérig* correspond

à l'augmentation ou bien la diminution de la *habba kbira (maaboud)* et mesure le fonctionnement du système au cours du temps.

En second lieu, le fabricant associe à la plaque désignée un support en cuivre qui assurera la stabilité de la *chekfa* au cours de la mesure. Ainsi un diamètre de référence (repère) au dessus et au milieu de la plaque.



Fig.4.2.Chekfa région de Tamentit (Slimani.S,2007)



Fig.4.3. Chekfa circulaire région de Tamentit (Slimani.S,2007)

La valeur de la *habba* varie selon les régions, entre 3 et 3,5 litres à la minute.

L'historiographie locale attribue la *hallafa* (*chekfa*) aux premiers recenseurs connus venus pour le compte du sultan établir l'assiette fiscale : l'innovateur aurait été *Al-addai* en 1540, un certain « *caïd el nassir* » aurait apporté quelques correctifs à la subdivision des unités de numération hydraulique. La *chekfa* porte sa partie supérieure soit une échancrure, soit une rangée verticale de coups de poinçon destinés à servir de repère pour constater l'équilibre du débit de la *segua*. Enfin, elle est munie de piquets, soit de barres de bois permettant de la fixer comme barrage au travers de la séguia.(fig.4.2). [A. Saïd,1983].

4. MESURE DES DEBITS PAR LA CHEKFA

Pour mesurer le débit on installe *la chekfa* au travers de la séguia qui reçoit l'eau de la foggara de façon que la séguia soit complètement barrée Fig.4.4 , toute l'eau s'écoule par les ouvertures de l'instrument Ceci étant fait, le "*Kiel el ma*" procède par tâtonnements et effectue les opérations suivantes:

- Bouche ou débouche un certain nombre de trous de *la chekfa* jusqu'à ce que l'équilibre soit établi, ce qui est réalisé quand le niveau de l'eau reste stationnaire dans *la chekfa*, affleurant l'extrémité inférieure de l'échancrure ou l'un des trous de poinçon.
- Il suffit alors donc de compter le nombre de *habbas* ou de fractions de *habba* correspondant aux trous restés ouverts pour connaître le débit de la foggara.
- Enregistrement des résultats de la mesure sur la plaque d'argile en utilisant les signes locaux (||, +, •, ••, +, •, |||, |) qui sont connus par les *ksouriens* (Fig.4.3.)

Remarquons que toutes ces opérations sont toujours accompagnées par les *chahed* et les *hassabines* munis des registres de la foggara appelé *zamam*.

Le débit partagé étant ainsi déterminé, la part revenant à chacun des propriétaires se calcule suivant les méthodes locales par les "*hassabines*". Il reste à procéder au partage effectif en attribuant à la séguia de chaque propriétaire la quantité d'eau qui lui revient.

Par une nouvelle intervention de "*Kiel el ma*" et sa *chekfa* on commence par :

Premièrement ; installer au débouché de la séguia principale un partiteur appelé « *guasseria* » ou « *kasria* » Fig.4.4, formé d'une pierre plate rectangulaire placée verticalement et percée d'ouvertures pratiquées à l'avance dans des dimensions un peu inférieures celles qu'elles doivent avoir définitivement. La tâche du *kial* est précisément de modifier les dimensions de ces ouvertures, de telle façon qu'elles correspondent exactement au débit revenant à chaque propriétaire. Pour ce faire,

- Il place *la chekfa*, dont il n'a laissé ouvert que les trous correspondants au nombre de *habbas* à attribuer, sur la séguia secondaire et sur une faible distance (un demi-mètre environ) en aval de *la kasria*.
- Il la met en communication en élevant de petits obstacles latéraux, avec l'ouverture correspondante de la *kasria*.

- Muni d'un petit pic, il agrandit alors, par tâtonnements successifs l'ouverture de la *guasseria* jusqu'à ce que l'équilibre hydrostatique soit réalisé.

Le débit fourni par l'ouverture sera égal au débit des trous de *la chekfa*. Il procède de même pour chaque séguia secondaire appartenant à un propriétaire différent.



Fig.4.4. Opération de mesure à l'aide d'une Chekfa circulaire à Aoulef dans la région du Tidikelt (Benziada.s,1996)



Fig.4.5. Opération de mesure à l'aide d'une Chekfa rectangulaire à Ain zeglouf près de Reggane (Benziada.s,1996)

5. UNITES ET METHODE DE DISTRIBUTION DE DEBIT D'UNE FOGGARA.

Les méthodes utilisées dans la distribution équitable de la quantité d'eau qui arrive à travers les galeries souterraines, se fait en utilisant l'instrument de mesure « *chekfa* ». L'unité de mesure principale de la *chekfa* selon les peuples qui occupent les régions du Touat, Tidikelt et Gourara, est désignée respectivement par *habba zérig*, *habb et Aoud*.

Les *hassabines* utilisent une plaque de nature argileuse pour montrer aux propriétaires, et les autres citoyens utilisent *la habba* et ses unités de fraction par des signes conventionnels simples à comprendre. Ainsi toutes les opérations réalisées par les *hassabines* (résultat de mesure) sont archivées et conservées.

5.1 Méthodes de distribution :

La méthode de calcul est un peu ardue, et pour l'explicitier deux exemples seront présentés:

5.1.1 Exemple 1 :

Supposons que 36 individus ont participé à la réalisation d'une foggara, dont le débit est de 86 *habba*. Ce débit doit être distribué équitablement à chaque individu en considérant qu'ils ont chacun dépensé la même somme des frais dans la réalisation de cette foggara. Donc l'opération de la distribution se fait de la manière suivante :

$\frac{86}{36} = 2 \text{ habba et } \frac{14}{36} \text{ habba}$ on remarque que $\frac{14}{36} \text{ habba}$ est petit par rapport à 1 *habba*, autrement dit il est inférieur à *la habba*. C'est pour cela que l'on doit la multiplier par 24 pour la transformer en *kirat (fels)*. Donc le calcul devient :

$$\frac{14}{36} \text{ habba} = \frac{14}{36} * 24 = \frac{28}{3} \text{ kirat} = 9 \text{ kirat et } \frac{1}{3} \text{ kirat}$$

D'autre part $\frac{1}{3} \text{ kirat} = \frac{1}{3} * 24 \text{ kirat du kirat}$ et cette dernière somme représente un débit extrêmement faible. On l'ignore et comme cela la part de chacun de ces individus doit être 2 *habba* et 9 *kirat*.

5.1.2 Exemple 2 :

Un débit d'une foggara est estimé à environ de 524 *habba*. Et cette quantité est nommée l'apport total de la foggara. Après la distribution, on a trouvé un apport de l'ordre de 280 *habba* et supposons que la part d'un des propriétaires de cette foggara est d'environ 4 et $\frac{6}{24} \text{ habba}$. Comment le kiel el ma doit intervenir pour faire la distribution et ainsi faire ressortir la part de ces individus ?

Pour jauger cette foggara, le *kiel el ma* place sa *chekfa* dans la place destinée à la distribution de la quantité d'eau accumulée afin d'établir un régime permanent. Le *kiel el ma* commence par boucher tous les trous de la *chekfa*. Ensuite, les ouvrir un à un selon la demande de l'opération et finalement on obtient le débit jaugé. Après tout cela, on doit déterminer maintenant la *habba* de l'apport total (524), et combien représente le débit jaugé (280). Ce dernier s'appelle *habba zerig* et les calculs se font comme suit :

5.1.3 calcul

$\frac{280}{524}$ *habba* inférieure de *la habba*, donc on doit la transformer en *kirat* en multipliant par 24,

$$\text{autrement dit } \frac{280}{524} \text{ habba} = \frac{280}{524} * 24 \text{ kirat} = \frac{432}{524} \text{ kirat} + 12 \text{ kirat}$$

12 kirat représente une demi (1/2) *habba* et $\frac{432}{524}$ *kirat* inférieur du *kirat* c'est pour ça qu'on le transforme en *kirat du kirat*.

$$\frac{432}{524} \text{ kirat} = \frac{432}{524} * 24 \text{ kirat du kirat} = 19 \text{ kirat du kirat} + \frac{412}{524} \text{ kirat du kirat}$$

On ignore $\frac{412}{524}$ *kirat du kirat* et on prend 19 du *kirat du kirat* $\frac{19}{24}$ *kirat* et enfin la *habba* devient 12 et $\frac{19}{24}$ *kirat zrig*. Si quelqu'un à une part 4 et $\frac{6}{24}$ *habba* de l'apport total avant le jaugeage combien il reçoit après ?

Premièrement on cherche que représente actuellement 4 *habba*:

$$4 * 12 \text{ kirat} = \frac{1}{2} * 4 \text{ habba} = 2 \text{ habba}$$

$$4 * \frac{19}{24} \text{ kirat} = \frac{76}{24} = \frac{19}{6} = 3 \text{ et } \frac{1}{6} \text{ kirat} = 3 \text{ kirat et } 4 \text{ kirat du kirat}$$

Donc 4 *habba* donne 2 *habba* et 3 et 1/6 *kirat zerig*

Maintenant, il nous reste à trouver $\frac{6}{24}$ *habba*?

$$\frac{6}{24} * 12 = 3 \text{ kirat et } \frac{6}{24} * \frac{19}{24} = \frac{1}{4} * \frac{19}{24} = \frac{19}{4} \text{ kirat du kirat} = 5 \text{ kirat du kirat}$$

Finalement la part de cet individu est égale 2 *habba* et 6 *kirat* et 9 *kirat du kirat*.

Remarque :

On remarque que le nombre 24 est un multiple de 2,3,4,6 ,8 et 12

Ces calculs suivent la règle de trois et on peut démontrer et justifier les résultats précédents :

$$524 \dots\dots\dots 280$$

$$4 + \frac{6}{24} \text{ habba} \dots\dots\dots x$$

$$X * 524 = 280 * (4 + \frac{6}{24})$$

$$X = \frac{280}{524} \left(4 + \frac{6}{24} \right) = \frac{280}{524} \left(4 + \frac{1}{4} \right) = \frac{280 * 4}{524} + \frac{280}{4 * 524}$$

$$X = \frac{280}{131} + \frac{35}{262} = 2 + \frac{18}{131} + \frac{35}{262}$$

Autrement dit :

$$\text{La valeur de } x \text{ est égale à } 2\text{habba} + \frac{18}{131} + \frac{35}{262} \text{ habba}$$

On transforme la valeur de $\frac{18}{131} + \frac{35}{262} \text{ habba}$ au *kirat en* multipliant par 24

$$\frac{18}{131} + \frac{35}{262} \text{ habba} * 24 = \frac{12 * 24}{131} + \frac{35 * 24}{262} = \frac{12 * 24}{131} + \frac{35 * 12}{131} = \frac{852}{131} = 6 + \frac{66}{131}$$

Donc la part devient 2 *habba* et $6 + \frac{66}{131} \text{ kirat}$, ensuite on multiplie la valeur $\frac{66}{131}$ par 24.

Ce qui donne:

$$\frac{66}{131} \text{ kirat} * 24 = 12 + \frac{12}{131} \text{ kirat du kirat}$$

finalement on néglige la valeur $\frac{12}{131} \text{ kirat du kirat}$

$$\text{La part globale est donc : } 2\text{habba} + 6 \text{ kirat} + 12 \text{ kirat du kirat}$$

On remarque qu'il ya un différence entre le résultat trouvé par le calcul du kiel el ma et celui calculé par la méthode de la règle de trois

La différence est de l'ordre de 3 *kirat du kirat* qui représentent $\frac{1}{8} \text{ kirat}$ et ce dernier n'existe pas dans *la chekfa*. Cette différence est dû à la négligence de la quantité à étalonner dans la valeur de la *habba*

CONCLUSION

Le fonctionnement hydraulique du système de la foggara est régi par un écoulement gravitaire de l'eau d'une zone supérieure à une zone située dans le contre bas du point de vue topographique. Le système de la foggara est composé de deux parties. La première est la partie drainante (amont) et une deuxième partie est la partie avale où l'eau est acheminée dans un canal d'amené vers le réseau de distribution. Une technique spécifique et bien définie pour répartir la quantité d'eau en utilisant un instrument de mesure : La chekfa qui permet d'allouer à chaque allocataire sa part d'eau qui lui revient par une méthode de calcul ardue basée sur des notions locales.

INTRODUCTION

L'hydrodynamique a pour but d'étudier les mouvements des liquides en fonction des forces qui leurs donnent naissance. Torricelli en 1644 dans le Modu Aquarum du traité Opéra Geométrica, a expliqué et établie l'équation régissant la vidange d'un réservoir rempli par un liquide à travers un trou. La mesure des débits dans le système foggara, utilise le principe de l'écoulement à travers les orifices. La vérification et l'analyse de mesures obtenues à partir de la chekfa seront développées dans ce qui suit.

1. ECOULEMENT A TRAVERS LES ORIFICES

1.1. Orifices non noyés :

L'écoulement se fait à partir d'un bassin de grande dimension dont le niveau est supposé constant. A travers un orifice ménagé dans la paroi, l'écoulement se fait à l'air libre.

A une certaine distance de la paroi, la veine fluide s'est contractée. Dans cette section, dite contractée, les vitesses sont parallèles entre elles et le terme P^* est constant. On peut alors appliquer le **théorème de Bernoulli** (5.1) entre un point A à la surface libre et un point B de la section contractée.

Soit ω la surface de l'orifice et $m\omega$ la surface de la section contractée ; m est appelé coefficient de contraction ($m < 1$).

$$\text{En A : } V_A = 0 \quad P_A = P_{\text{atm}} \quad Z_A = H$$

$$\text{En B : } V \quad P_B = P_{\text{atm}} \quad Z_B = h$$

$$\frac{P_{\text{atm}}}{\rho g} + H = \frac{P_{\text{atm}}}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + h \quad (5.1)$$

$$V = \sqrt{2g(H - h)} = \sqrt{2g(\Delta H)} \quad (5.2)$$

Cette formule est appelée formule de **Toricelli** où ΔH représente la charge sur l'orifice

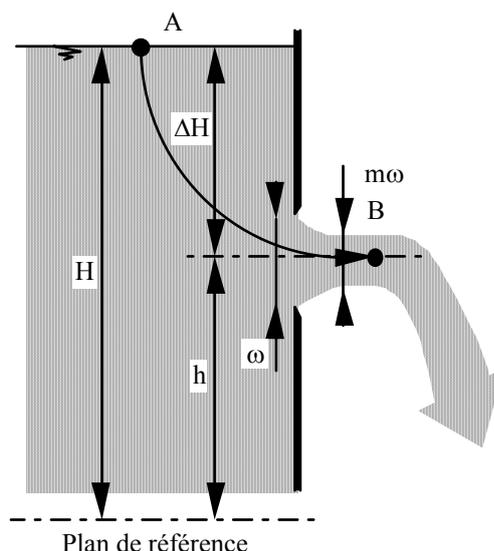


Fig.5.1. Orifice non noyés

Le débit est obtenu en intégrant la vitesse sur toute la section contractée, d'où :

$$Q = \int_{m\omega} \sqrt{2g(H-h)} ds \tag{5.3}$$

Cette intégrale est généralement difficile à calculer et on fait l'approximation suivante : la vitesse moyenne dans la section contractée est celle de la molécule qui passe au centre de gravité de cette section.

$$Q = m\omega \sqrt{2g\Delta H} \tag{5.4}$$

Cette formule est d'autant moins approchée que l'orifice est petit par rapport à la charge.

La valeur du coefficient m dépend de la nature de l'orifice et on distingue :

1.1.1 Les orifices en mince paroi

L'épaisseur de la paroi est plus petite que la moitié de la plus petite dimension transversale de l'orifice. Dans ce cas, **le coefficient de contraction** dépend encore de la forme de l'orifice, position par rapport à la verticale et par l'acuité des arêtes.

En première approximation et pour un orifice circulaire, on peut admettre $m = 0,62$

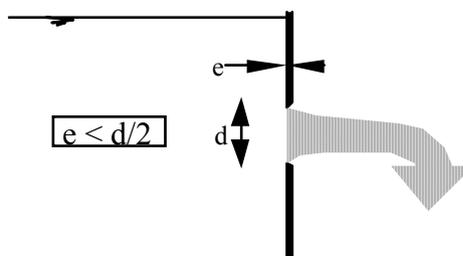


Fig.5.2. Orifice à mince paroi

1.1.2. Les orifices à veine moulée

La paroi intérieure de l'orifice épouse la forme de la veine de manière à ce que la section contractée soit à l'intérieur de la paroi.

Dans ce cas, on aurait théoriquement $m=1$ mais en fait, il se produit toujours des pertes de charge et on ne dépasse jamais $m=0,98$

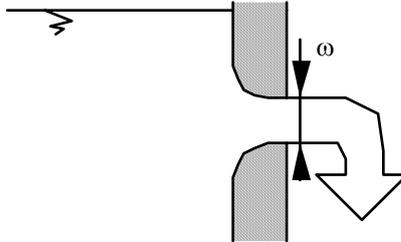


Fig.5.3. Orifice à veine moulée

1.1.3. Les orifices à contraction incomplète

Le coefficient de contraction varie entre 0,62 et 1. Le cas le plus fréquent est celui de la vanne de fond où $m = 0,70$.

$$Q = 0,70 L e \sqrt{2g H} \quad (5.5)$$

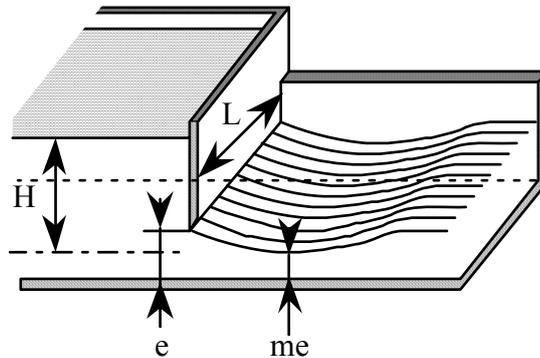


Fig.5.4. Orifice à contraction incomplète

1.2. Orifices noyés :

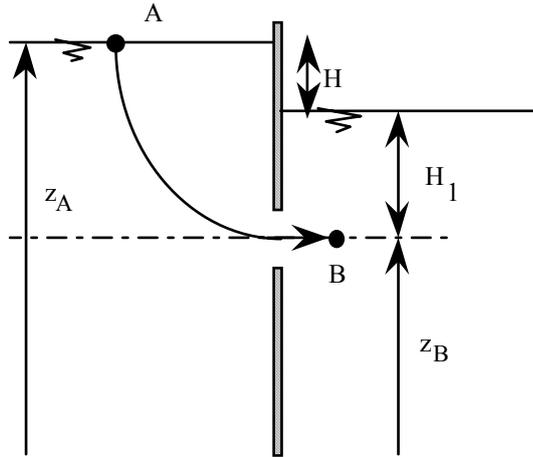


Fig.5.5. Orifice noyé

On applique le théorème de Bernoulli entre les points A de la surface et B de la section contractée.

$$P_A = P_{atm} \quad V = 0 \quad z_A$$

$$P_B = \rho g H_1 + P_{atm} \quad V \quad z_B$$

$$\frac{P_{atm}}{\rho g} + z_A = \frac{P_{atm}}{\rho g} + H_1 + z_B + \frac{V^2}{2g}$$

$$\frac{V^2}{2g} = z_A - z_B - H_1$$

$$\frac{V^2}{2g} = H$$

On obtient une formule analogue à celle du régime dénoyé mais H représente ici la différence de cote entre les plans d'eau amont et aval.

$$V = \sqrt{2gH} \quad (5.6)$$

Les valeurs des coefficients de contraction sont légèrement inférieures en régime noyé qu'en régime dénoyé.

Après ces rappels des principaux éléments théoriques décrivant les orifices pour l'évaluation de leurs débits, nous allons aborder la partie expérimentale liée aux mesures pratiques en laboratoire des différents types de *Chekf*as.

2. DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL:

Le dispositif expérimental est composé d'un réservoir cylindrique (R1) alimenté à partir d'un banc hydraulique. Un niveau constant est maintenu au dessus de l'orifice étudié, à partir d'une vanne d'alimentation. L'eau sort du réservoir à travers un orifice à mince paroi de diamètre bien défini et correspondant aux différents diamètres de la chekfa étudiée. Le filet d'eau ainsi obtenu et mesuré par débimétrie volumique à l'aide d'une éprouvette gradué et d'un chronomètre.(Voir fig 5.6).

Les résultats sont représentés dans un tableau récapitulatif n°5.9

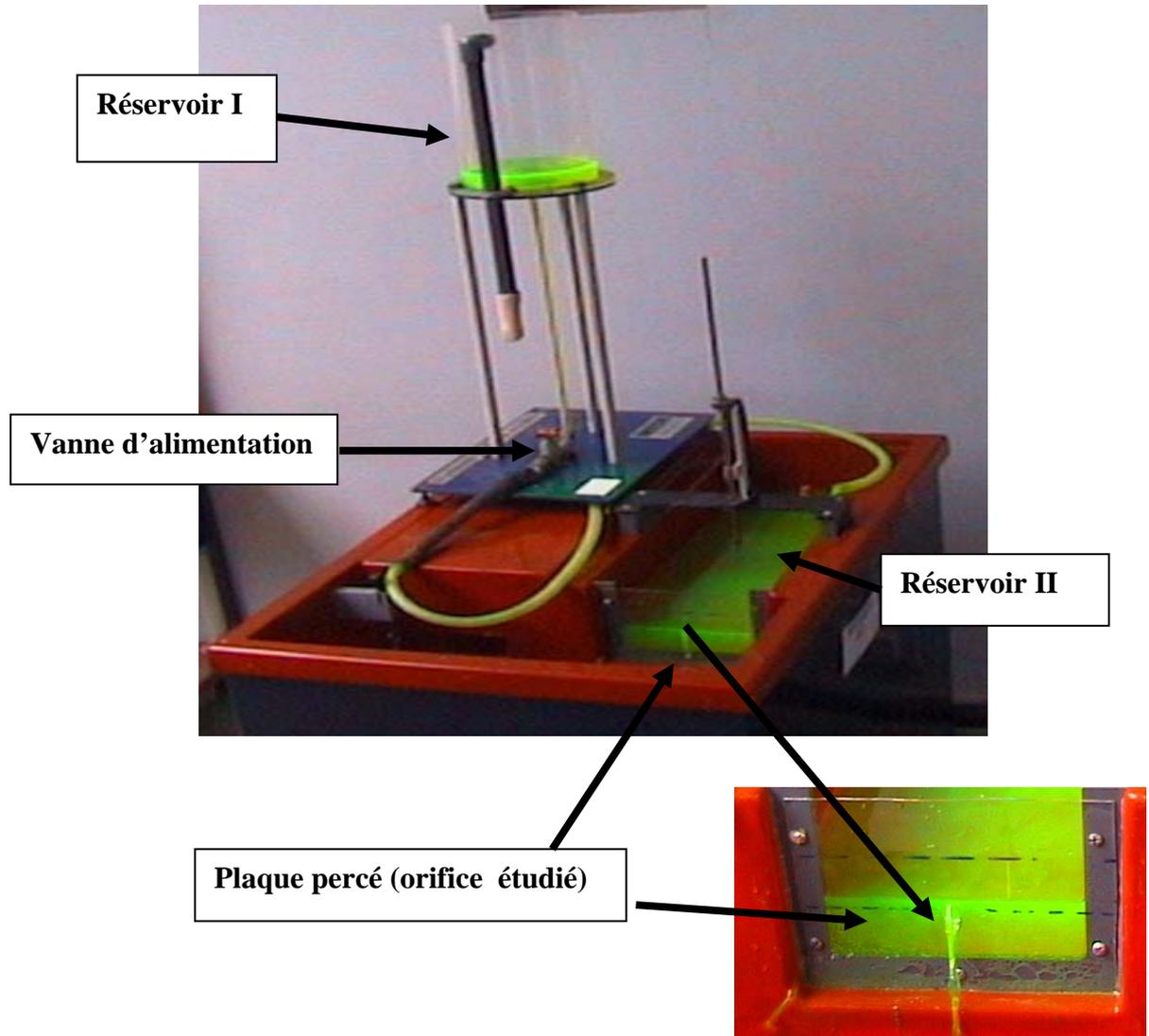


Fig.5.6. Dispositif de mesure

3. RESULTATS ET DISCUSSION (INTERPRETATION)

Comme dans toutes études expérimentales et avant de présenter les résultats finaux. On doit vérifier le bon fonctionnement de l'installation expérimentale. Une analyse des données mesurées à partir de ce dispositif expérimental doit être effectuée.

3.1. Analyse des données expérimentales :

Comme la *chekfa* est définie par une hauteur de référence h_f (la charge au dessus du trou de l'orifice), et un diamètre d'orifice qui correspond à l'unité de mesure *habba*. Les figures (5.7,5.8,5.9,5.10) nous ont permis de définir quatre types de *chekfa*

- 1-) La *chekfa* de *LITCHA* (région de Timimoun) :

Un résumé des caractéristiques géométriques de la *chekfa* de Timimoun est présenté dans le tableau 5.1

Tableau 5.1 : Caractéristique de *chekfa* de *LITCHA* (fig 5.7)

Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Epaisseur (mm)	Hauteur Spécifique (mm)
550	80	2	53

- 2-) La *chekfa* de *Ouarmoul el Kebir* (région de Tamentit) (fig 5.8)

On présente également les caractéristiques de la *chekfa* de *Ouarmoul el Kebir* (région de Tamentit) dans le tableau 5.2

Tableau 5.2 : Caractéristique de *chekfa* de *Ouarmoul el Kebir* (région de Tamentit)

Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Epaisseur (mm)	Hauteur de référence (mm)
1000	124	2	40

- 3-) *Halfa de Ouarmoul el serir* (région de Tamentit) (fig 5.9)

Pour un apport faible de débit une *chekfa de Ouarmoul el serir* (région de Tamentit) a été trouvée, dont les caractéristiques sont représentés dans le tableau 5.3

Tableau 5.3 : Caractéristique de *chekfa de Ouarmoul el serir* (région de Tamentit)

Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Epaisseur (mm)	Hauteur de référence (mm)
700	105	2	30

- 4-) Ancien *Chekfa* région Tamentit (pour les grandes debit) (fig 5.10)

Une ancienne *chekfa* a été utilisée à l'époque dans la région de Tamentit, ses caractéristiques sont représentés dans le tableau 5.3

Tableau 5.4 : Caractéristique de l'ancien *chekfa* (région de Tamentit)

Longueur (mm)	Hauteur (mm)	Epaisseur (mm)	Hauteur de référence (mm)
328	115	3	78

A partir de cette classification, on peut trouver pour une seule région différents types de *chekfa*, comme dans le cas de la commune de Tamentit, et cela est dû à l'augmentation ou bien à la diminution du niveau d'eau dans les foggaras pendant leur fonctionnement au cours du temps. Et pour bien expliciter cet élément on donne un exemple : si nous avons deux foggaras pour laquelle le débit est égal 1000 *habba* et 10 *habba* pour la première, et pour la deuxième respectivement. Donc le *kiel el ma* utilise la *chekfa* présenté dans la figure 5.10 qui contient les orifices de grand diamètre pour distribuer la quantité 1000 *habba*, par contre il utilise la *chekfa* figure 5.8 ou les diamètres ne sont pas assez grand.



Fig.5.7. Chekfa de Licha région de Timimoun

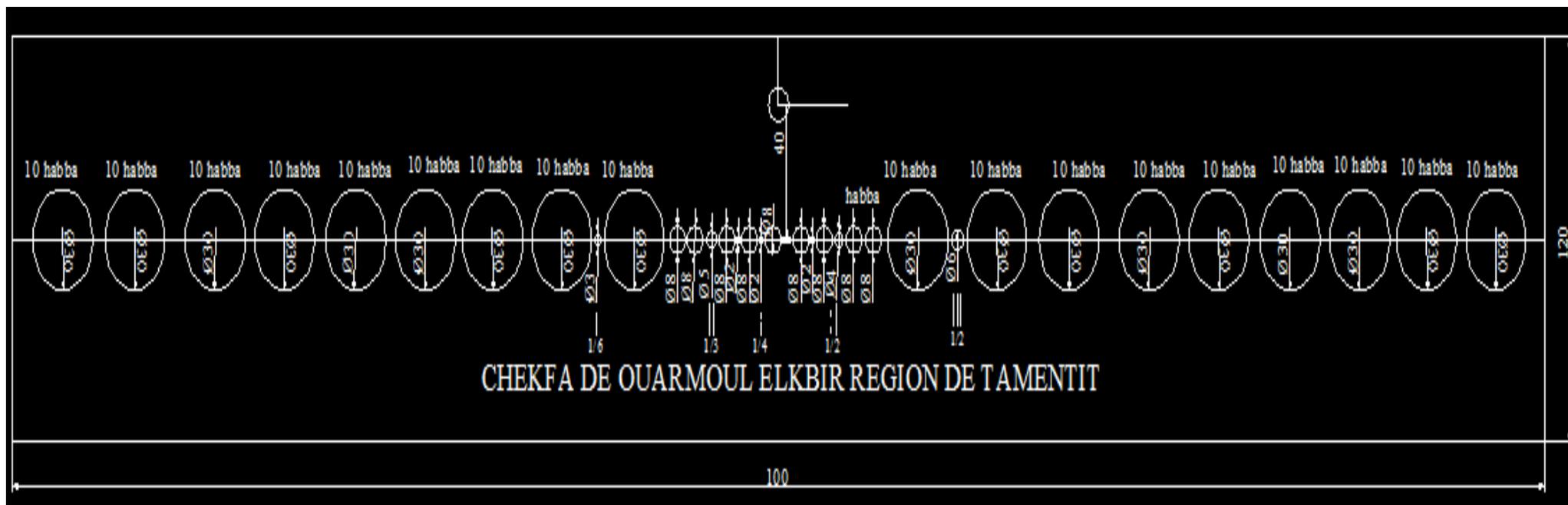


Fig.5.8. Chekfa de Ouarmoul elkbir région de Tamentit

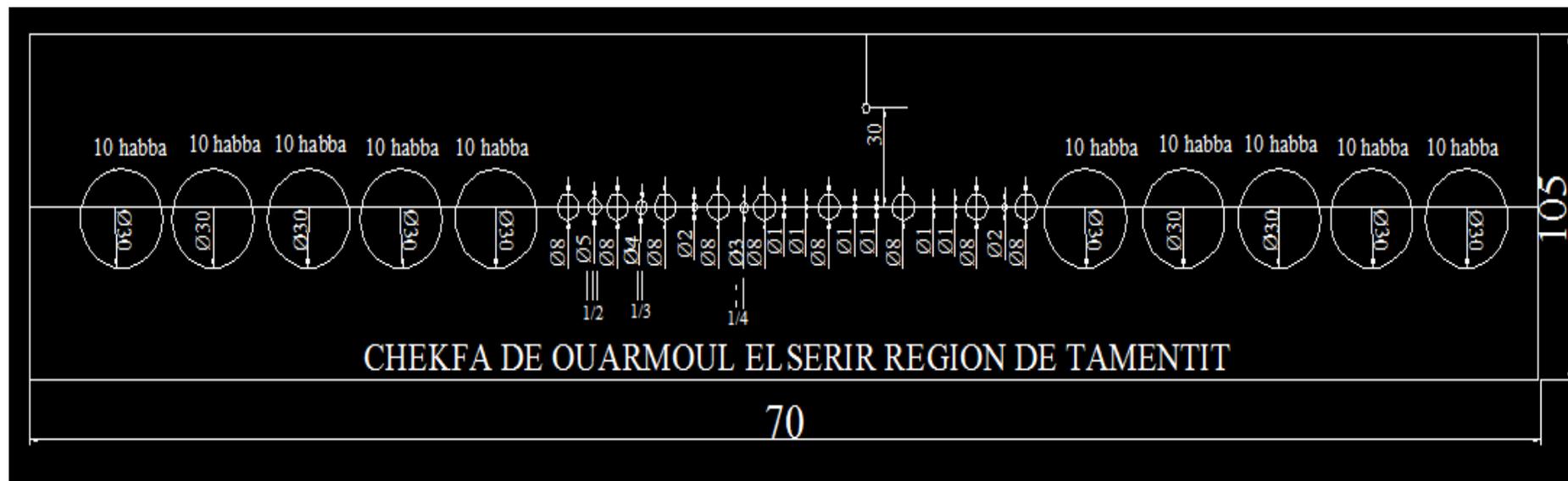
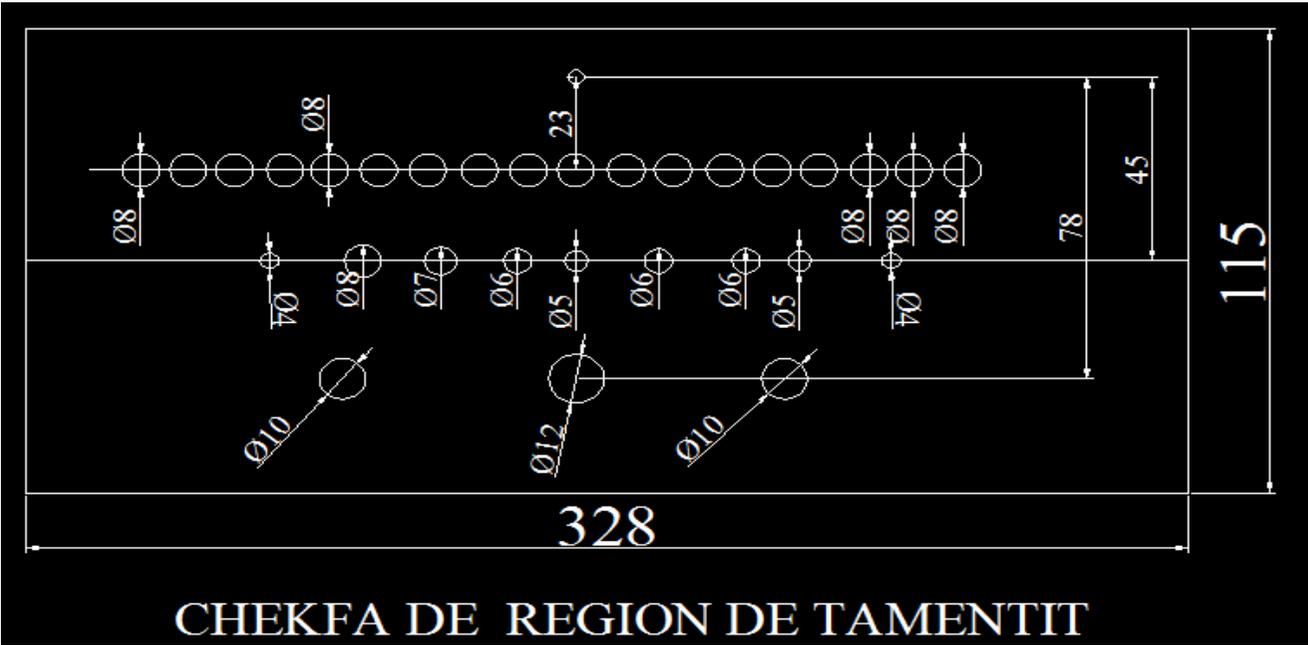


Fig.5.9. Chekfa ouarmoul elserir région de Tamentit



4. ANALYSE DES VALEURS EXPERIMENTALES DE DEBIT

Le dispositif expérimental, nous a permis de calculer les valeurs de débit en fonction du diamètre et la hauteur (la charge). On applique le principe de calcul utilisé dans le système traditionnelle foggara en fixant la hauteur et on fait varier les diamètres.

On calcule le temps nécessaire à remplir un bécber par un volume d'eau sorti de l'orifice de la *chekfa*. Les valeurs de débit représentent alors la division du volume par le temps mesuré.

Tableau 5.5. Valeurs des débits de *chekfa ouarmoul el kbir* :

diamètre (mm)	débit (ml/s)
2	2,1
3	5,7
4	8,2
5	11,1
6	19,6
7	27,8
8	33,1
9	42,5
10	57,2
11	67,5

Tableau5.6. Valeurs des débits de *chekfa ouarmoul el serir* :

diamètre (mm)	débit (ml/s)
2	1,7
3	4,8
4	7,2
5	9,1
6	15,9
7	22,3
8	27,4
9	37,5
10	49,5
11	58,4

Tableau5.7. Valeurs des débits de chekfa LICHA

diamètre (mm)	débit (ml/s)
2	2,4
3	6,9
4	9,7
5	15,5
6	24,4
7	33,5
8	39,2
9	49,8
10	67,1
11	80,1

Tableau5.8. Valeurs des débits de Tamentit :

diamètre (mm)	débit (ml/s)
2	1,5
3	3,8
4	6,3
5	7,4
6	14,9
7	18,8
8	23,7
9	32,2
10	43,3
11	50,6

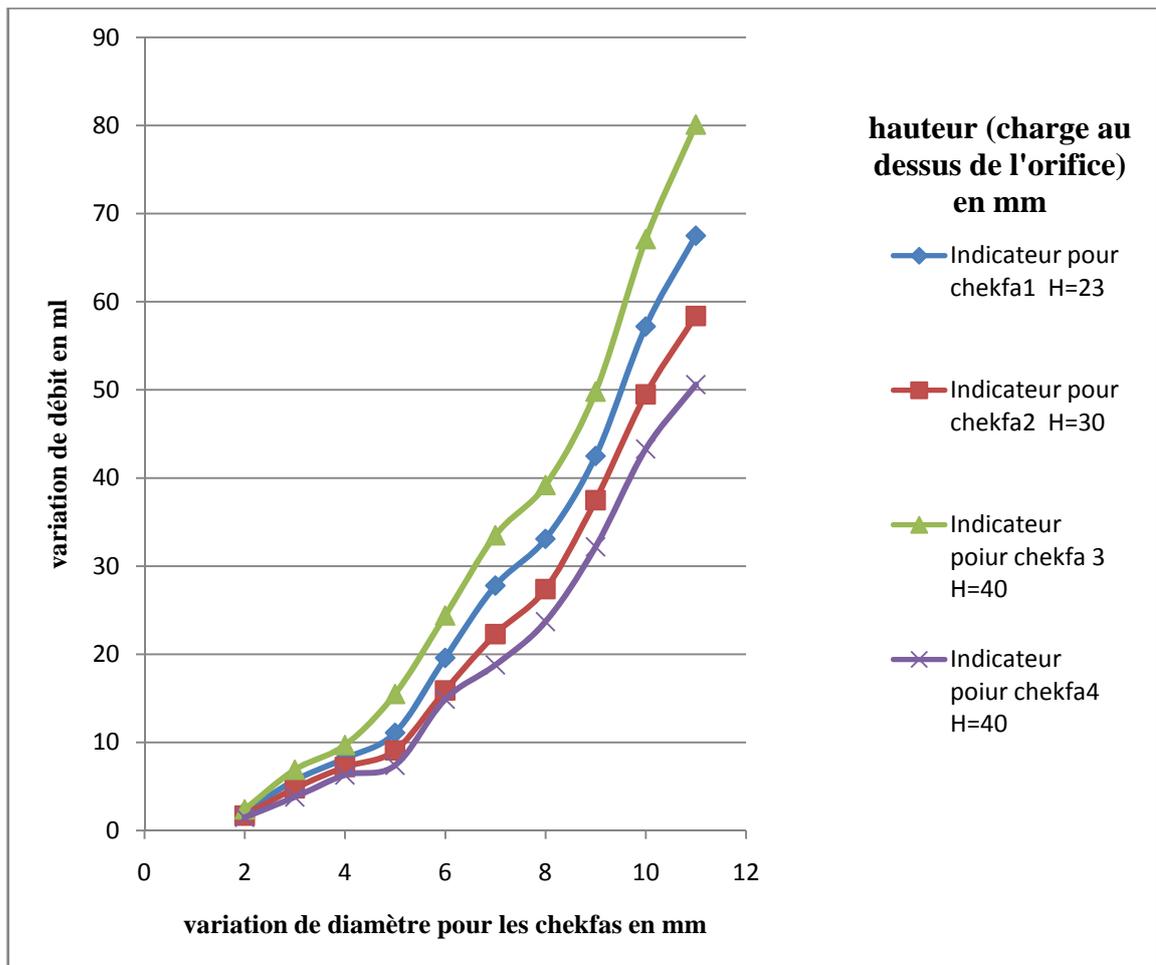


Fig.5.11. Variation de débit en fonction de diamètre

Interprétation de Fig.5.11

On remarque que les courbes tracées à partir de variation des valeurs de débit en fonction de la variation de diamètre pour les quatre *chekfa* utilisées dans la mesure expérimentale ont la même tendance. Pour des petits diamètres, les courbes convergent vers le point zéro. Elles tendent vers l'infini quand les diamètres sont grands.

La tendance de ces courbes est de la famille des équations puissance. Cela veut dire qu'il y a une concordance entre les équations puissances et la formule de Torricelli.

TABLEAU RECAPITULATIF**Tableau 5.9** : Valeurs de débits en ml/s

Diamètre(mm) Hauteur(mm)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
23	1,6	3,8	6,3	7,4	14,9	24,3	20,7	32,2	43,4	50,6
25	1,7	4,5	6,4	8,4	15,5	25,4	25,2	34,0	45,2	53,3
30	1,8	4,8	7,2	9,1	15,9	27,8	27,4	37,5	49,5	58,4
40	2,1	5,6	8,2	11,0	19,6	30,9	33,1	42,5	57,2	67,5
43	2,1	5,9	8,9	12,8	22,4	33,8	33,2	40,8	59,3	69,9
45	2,2	6,1	9,0	12,9	22,4	34,2	34,7	47,9	60,7	71,6
53	2,4	6,9	9,6	15,5	24,1	37,1	38,9	49,8	65,8	77,0
55	2,5	6,9	9,7	15,9	24,4	37,9	39,2	49,8	67,1	80,1
78	2,9	8,9	11,6	25,9	29,0	44,9	44,2	59,3	79,9	90,6

Les valeurs dans le tableau récapitulatif n° 5.9 représentent les valeurs expérimentales de débit. Le dispositif expérimental (Fig.5.6) nous a permis de définir la variation de débit en fonction de la hauteur spécifique h_r de chaque *chekfa*, afin de régler la charge au dessus de l'orifice à étalonner à l'aide d'une règle graduée pour l'identifier.

Après analyse des valeurs des lignes et des colonnes de tableau n°5.9 on constate que les valeurs de débit varient en fonction de deux conditions:

- La variation de diamètre de l'orifice percé dans la plaque de mesure *chekfa*
- Le changement de la charge H au dessus de l'orifice au cours de mesure de débit dans le dispositif expérimentale (Fig.5.6)

Ce qui explique cette variation de débit est une loi bien déterminée. Comme nous l'avons montré dans la première partie, chaque écoulement par un orifice suit la loi de Torricelli qui a pratiquement la même forme de courbes.

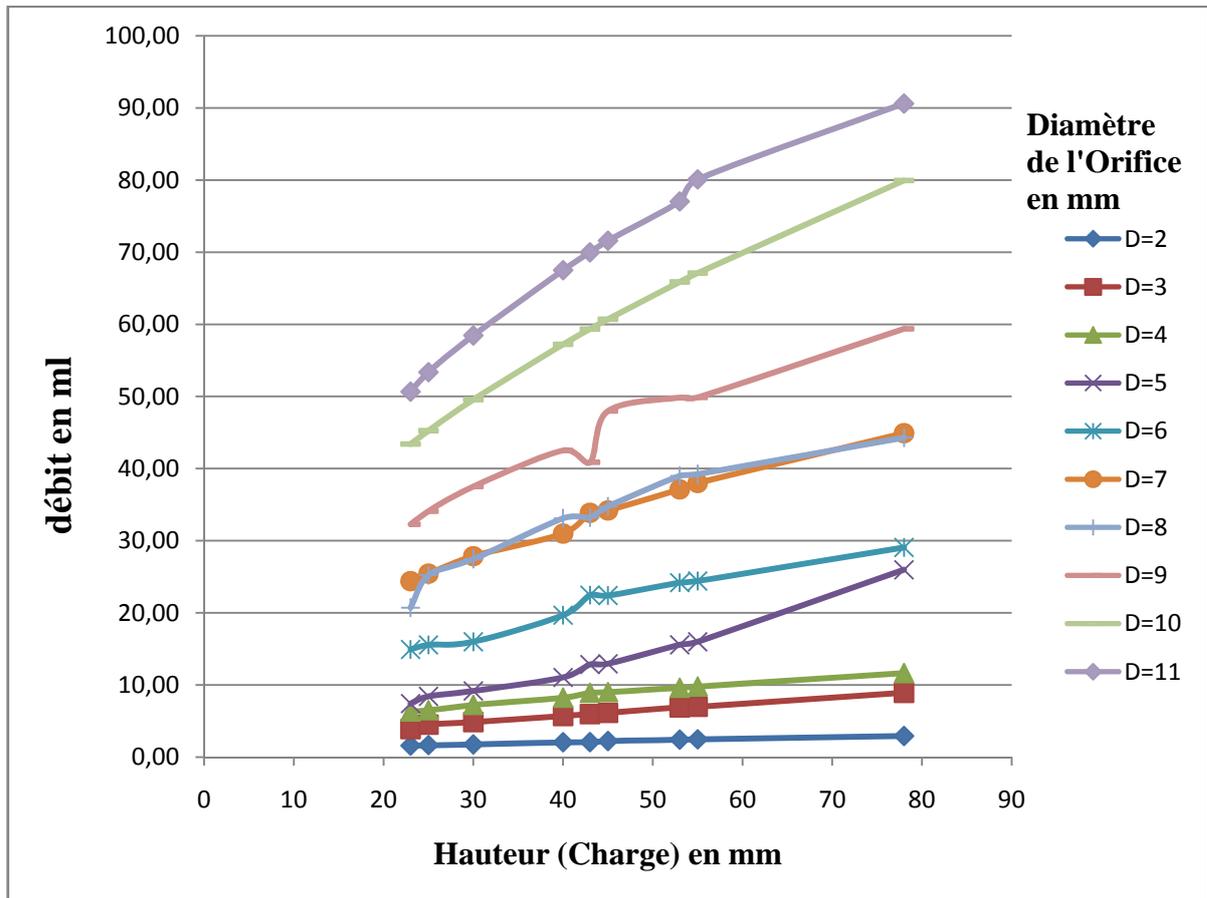


Fig.5.12. Variation du débit en fonction des hauteurs

Après le tracé courbe $Q=f(h)$ Fig.5.12, on constate que :

- Toutes les courbes ont une même allure sur l'axe des hauteurs malgré la variation des débits qui représente l'autre axe du plan.
- On peut considérer que les courbes d'orifice 8mm de diamètre pour la *chekfa* de Tamentit et 10,11mm de diamètre pour la *chekfa* de Timimoun représentent les valeurs d'unité *habba* correspondants à leurs hauteurs de référence.
- Donc, la multiplication des restes des valeurs par des fraction nous a donné forcément les valeurs des courbes tracées pour les orifices 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 6mm, 7mm et 9mm de diamètre.
- La correspondance de l'unité *habba* de chaque *chekfa* et ses fractions est vérifiable d'après la superposition des courbes, il suffit de translater une courbe pour trouver les autres.

5. VALIDATION DES RESULTATS

Pour passer à la validation des résultats expérimentaux, on utilise les méthodes d'analyse statistiques. Ces méthodes nous permettent de trouver une relation bien définie entre les valeurs observées (valeurs à expliquer), et les valeurs explicatives (les facteurs), c'est-à-dire (Y,X) respectivement .

L'analyse consiste a trouver un modèle adapté au valeurs (X,Y) représentées au tableau n° . 5.9

Ainsi le tableau représente un cas simple d'un modèle de régression simple. Le but d'une analyse de régression est d'étudier les relations qui existent entre les valeurs de *habba* (Y), et leurs fractions de *habba*.

Il existe une relation linéaire entre X et Y , on écrit donc le modèle de régression suivant :

$$y = \beta_1 + \beta x + \varepsilon \quad (5.7)$$

Où ε est un résidu que l'on espère le plus petit possible.

Hypothèses : les observations y_i sont des réalisations 09 aléatoires indépendantes y_i de moyenne $\beta_1 + \beta x_i$ et de variance σ^2 .de manière équivalente, les résidus ε_i sont des réalisations de 09 variables aléatoires indépendantes E_i de moyenne 0 et de variance σ^2

5.1. Le modèle linéaire gaussien

Dans le modèle linéaire expliqué au paragraphe précédent, seuls les deux premiers moments des termes d'erreur (espérance et variance) sont supposés connus. Dans un modèle linéaire gaussien, on se donne une hypothèse supplémentaire: la distribution des résidus est supposée normale.

$$\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (5.8)$$

Cette hypothèse implique que les variables aléatoires y_i sont normalement distribuées.

5.2. Estimation des paramètres β_1 et β

Dans cette partie, la variance σ^2 est supposée connue. Les paramètres inconnus sont β_1 et β , et ils sont estimés à partir des données observées ($y_i, x_i, i = 1, \dots, 9$). Deux grandes méthodes sont utilisées:

- la méthode des moindres carrés qui ne suppose connues que l'espérance et la variance de y ;
- la méthode du maximum de vraisemblance, qui suppose les résidus Gaussiens.

On notera classiquement les estimations avec un « chapeau ». Par exemple $\widehat{\beta}_1$ désigne l'estimation de β_1 , c'est-à-dire une fonction de y (et de x). Rappelons ici que x est supposé connu, alors que y est une variable aléatoire (ou sa réalisation).

On appelle même valeur ajustée ou prédite ou attendue la fonction de y suivante :

$$\hat{y}_i = \widehat{\beta}_1 + \beta x_i \quad (5.9)$$

5.3. Les moindres carrés ordinaires

L'idée est de trouver la droite qui explique la plus grande partie possible de la relation entre la variable endogène et la variable exogène, c'est à dire trouver la droite qui minimise la partie inexpliquée ou la partie due à la fluctuation aléatoire. On cherche donc la droite qui passe le plus près possible de tous les points. En d'autres termes, la droite qui minimise la distance des points à la droite (les termes d'erreurs).

La méthode des moindres carrés consiste à trouver les valeurs de $\widehat{\beta}_1$ et $\hat{\beta}$ (estimateurs de β_1 et β) qui minimisent la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et les valeurs ajustées (somme des carrés des résidus) :

$$\min_{\widehat{\beta}_1, \hat{\beta}} \sum_{i=1}^n \hat{\varepsilon}_i^2 = \min_{\widehat{\beta}_1, \hat{\beta}} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \min_{\widehat{\beta}_1, \hat{\beta}} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\beta} - \widehat{\beta}_1 x_i)^2 \quad (5.10)$$

Puisque la fonction à minimiser a de bonnes propriétés (lisse, convexe), elle se minimise en prenant les dérivées de la somme par rapport $\widehat{\beta}_1$ et $\hat{\beta}$, en posant ces dérivées égales à zéro et en résolvant le système de deux équations à deux inconnues. On obtient :

$$\widehat{\beta}_1 = \bar{y} - \hat{\beta} \bar{x} \quad (5.11)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=0}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{s_{xy}}{s_{xx}} \quad (5.12)$$

5.4. Tests d'hypothèse et intervalles de confiance

Si les y_i sont des variables aléatoires normales, puisque les $\hat{\beta}$ sont des combinaisons linéaires des y_i alors ces estimateurs sont donc aussi des variables aléatoires normales. Plus particulièrement:

$$\widehat{\beta}_1 \sim N(\hat{\beta}, \sigma^2(\frac{1}{n} + \frac{x^2}{s_{xx}})) \quad (5.13)$$

$$\widehat{\beta}_2 \sim N(\beta_2, \sigma^2(\frac{1}{n} + \frac{x^2}{s_{xx}})) \quad (5.14)$$

On peut aussi tester l'hypothèse de nullité d'un des paramètres. Par exemple, pour tester l'hypothèse nulle $H_0: \beta_1 = 0$ vs l'hypothèse alternative $H_1: \beta_1 \neq 0$, on utilise la statistique

$$t_1 = \frac{\widehat{\beta}_1}{s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^2}{s_{xx}}}} \sim t_{n-2} \quad (5.15)$$

qui est distribuée selon une loi de Student à $n-2$ degrés de liberté.

On rejettera donc l'hypothèse nulle si $t_1 > t_{\alpha/2; n-2}$ au niveau α . Il est clair que ce test correspond à la présence (H_0) ou à l'absence (H_1) de 0 dans l'intervalle de confiance.

5.5. Coefficient de détermination :

On appelle coefficient de détermination le rapport entre la somme de carrés des résidus (sum of squared errors), et la somme totale des carrés (total sum of squares).

qui est donc la part de variation de Y expliquée par le modèle de régression. Géométriquement, c'est un rapport de carrés de longueur de deux vecteurs. C'est donc le cosinus carré de l'angle entre ces vecteurs : Y et sa projection \hat{y} sur Vecteur (X).

$$R^2 = SSR/SST \quad (5.16)$$

6. ANALYSE DES RESULTATS FINAUX :**6.1. Chekfa de ouarmoul elkbir****6.1.1 : Modèle linéaire pour demi habba chekfa de ouarmoul elkbir****Tableau 5.10** : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) pour *demi habba chekfa de ouarmoul elkbir*

Observation	débit habba(Y)	débit demi habba(X)	Résidus
1	23,7	14,9	-0,001
2	25,2	15,5	-0,0006
3	27,4	15,9	0,0009
4	33,1	19,6	0,0009
5	35,2	21,4	0,0002
6	36,7	22,3	0,0003
7	38,9	24,2	-0,0001
8	39,2	24,4	-0,0002
9	46,2	29,1	-0,0003

➤ Calcul statique ANOV

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.98$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=1,54$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nul ce qui explique le contrôle de linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}}=1,54*(1/2 \text{ de habba}) \quad (5.17)$$

Le rapport qui existe entre le débit de la *habba* et la *demi habba* pour la chekfa de *ouarmoul elkbir* est égale à 1,54.

6.1.2 Modèle linéaire pour 1/3 de habba chekfa de ouarmoul elkbir

Tableau 5.11 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) 1/3 de habba chekfa de ouarmoul elkbir

Observation	débit habba(Y)	débit 1/3 habba(X)	Résidus
1	23,7	7,41	0,0006
2	25,2	8,41	0,0003
3	27,4	9,16	-0,0001
4	33,1	11,04	-0,0004
5	35,2	12,83	-0,0004
6	36,7	12,93	-0,0001
7	38,9	15,57	-0,0002
8	39,2	15,99	-0,0001
9	46,2	25,97	0,0008

➤ Calcul statique ANOV

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.99$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=2,56$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 et donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nulle ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}}=2,56*(1/3 \text{ de habba}) \quad (5.18)$$

Le modèle (5.18) montre que le rapport qui existe entre le débit de la habba et de la demi habba pour la chekfa de ouarmoul elkbir est égale à 2,56

6.1.3 : Modèle linéaire pour 1/4de habba chekfa de ouarmoul elkbir**Tableau 5.12** : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) 1/4de habba chekfa de ouarmoul elkbir

Observation	débit habba(Y)	débit 1/4 habba(X)	Résidus
1	23,7	3,8	0,0009
2	25,2	4,5	0,0005
3	27,4	4,8	-0,0001
4	33,1	5,6	-0,0006
5	35,2	5,9	-0,0006
6	36,7	6,1	-0,0003
7	38,9	6,9	-0,0001
8	39,2	6,9	-0,0002
9	46,2	8,9	0,0001

➤ **Calcul statique ANOV**

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.99$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=3,99$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nulle ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}}=4*(1/4 \text{ de habba}) \quad (5.19)$$

Le modèle (5.19) montre que le rapport qui existe entre le débit de la *habba* et la demi *habba* pour la chekfa de *ouarmoul elkbir* est égale à 3,99.

6.1.3 Modèle linéaire pour 1/6 de habba chekfa de ouarmoul elkbir

Tableau 5.13: Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) 1/6 de habba chekfa de ouarmoul elkbir

Observation	débit habba(Y)	débit 1/6 habba(X)	Résidus
1	23,7	1,5	0,0001
2	25,2	1,6	0,0006
3	27,4	1,7	-0,0001
4	33,1	2,0	-0,0007
5	35,2	2,1	-0,0007
6	36,7	2,2	-0,0005
7	38,9	2,4	-0,0004
8	39,2	2,5	-0,0003
9	46,2	2,9	0,0002

➤ Calcul statique ANOV

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.99$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=7,01$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nul ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}}=7*(1/6 \text{ de habba}) \quad (5.20)$$

Le modèle (5.120) montre que le rapport qui existe entre le débit de la habba et la demi habba pour la chekfa de ouarmoul elkbir est égale à 7,00.

6.2. Chekfa de LICHA région de Timimoun

6.2.1 Modèle linéaire pour demi habba chekfa de LICHA

Tableau 5.14 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) *demi habba chekfa de LICHA*

Observation	débit habba(Y)	débit demi habba(X)	Résidus
1	50,6	32,2	-0,0007
2	53,3	34,0	-0,0007
3	58,4	37,5	-0,0008
4	67,5	42,5	0,0005
5	69,9	40,8	0,001
6	71,6	47,9	0,0009
7	77	49,8	-0,0009
8	80,1	49,8	0,002
9	90,6	59,3	-0,001

➤ Calcul statique ANOV

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.99$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=1,51$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nulle ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}}=1,51*(1/2 \text{ de habba}) \quad (5.21)$$

Le modèle (5.21) montre que le rapport qui existe entre le débit de la *habba* et la *demi habba* pour la chekfa de *LITCHA* est égale à 1,51.

6.2.2 Modèle linéaire pour 1/3 de habba chekfa de LICHA

Tableau 5.15 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) 1/3 de habba chekfa de LICHA

Observation	débit habba(Y)	débit 1/3 habba(X)	Résidus
1	50,6	20,7	-0,0001
2	53,3	25,2	-0,0006
3	58,4	27,4	0,001
4	67,5	33,1	0,0002
5	69,9	33,2	-0,0009
6	71,6	34,7	-0,002
7	77	38,9	-0,0005
8	80,1	39,2	0,002
9	90,6	44,2	0,0002

➤ Calcul statique ANOV

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.99$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=1,75$$

- La valeur de coefficient de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nulle ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}}=1,75*(\text{débit d'1/3 de habba}) \quad (5.22)$$

Le variable de X ($\beta =1.75$) dans L'équation (5.22) ne vérifie pas la conformité avec l'1/3 de habba . C'est dû à la détérioration de l'orifice de Chekfa LICHA.

6.2.3 Modèle linéaire pour 1/6 de habba chekfa de LICHA

Tableau 5.16 : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) 1/6 de habba chekfa de LICHA

Observation	débit habba(Y)	débit 1/6 habba(X)	Résidus
1	50,6	7,4	-0,002
2	53,3	8,4	-0,002
3	58,4	9,1	-0,0004
4	67,5	11,0	0,002
5	69,9	12,8	0,002
6	71,6	12,9	0,0009
7	77	15,5	0,0005
8	80,1	15,9	0,0009
9	90,6	25,9	-0,002

➤ Calcul statique ANOV

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.97$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}= 3$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nulle ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Débit}_{\text{habba}}= 3*(\text{débit d'1/6 de habba}) \quad (5.23)$$

Le variable de X ($\beta =3$) dans L'équation (5.23) ne vérifie pas la conformité avec l'1/6 de habba . C'est dû à la détérioration des orifices de chekfa LICHA

6.2.4: Modèle linéaire pour 1/8 de habba chekfa de LICHA**Tableau 5.17** : Valeurs de débit à expliquées (Y) et leurs valeurs explicatives (X) 1/8 de habba chekfa de LICHA

<i>Observation</i>	<i>débit habba(Y)</i>	<i>débit 1/8 habba(X)</i>	<i>Résidus</i>
1	50,6	6,3	-0,001
2	53,3	6,4	0,0003
3	58,4	7,2	-0,0001
4	67,5	8,2	0,001
5	69,9	8,9	-0,001
6	71,6	9,0	-0,0004
7	77	9,6	0,0005
8	80,1	9,7	0,002
9	90,6	11,6	-0,001

➤ **Calcul statique ANOV**

-Coefficient de détermination :

$$R^2 = SSR/SST=0.97$$

- Estimation de paramètre β :

$$\hat{\beta}=7,55$$

- La valeur de détermination R^2 est proche de 1 donc la qualité de l'ajustement par régression linéaire est très claire.
- Les résidus sont dispersés et leur espérance est presque nul ce qui explique le contrôle de la linéarité et la qualité de la régression.

$$\text{Debit}_{\text{habba}} = 7,55 * (\text{débit d'1/8 de habba}) \quad (5.24)$$

Le modèle (5.19) montre que le rapport qui existe entre le débit de la habba et la demi habba pour la chekfa de ouarmoul elkbir est égale à 7,55.

7. APPLICATION DES RESULTATS SUR LA FOGGARA DE MAKHLOUF TAMENTIT

Après avoir étalonné les orifices de la chegfa de la région de Tamentit, une application des résultats obtenus est effectuée aux débits de la foggara de Makhlof décrite dans le tableau 5.18.

Tableau 5.18 : Localisation de foggara de *Makhlof* (Source A.N.R.H Adrar)

Longitude	Latitude	Altitude	Débit Jaugeage	Longueur Km	Nb Puits
00°15'27W	27°45'45	242	2,7	10	200

En utilisant le *Zemam* de foggara *Makhlof* (voir annexe n° 1), on peut reconstituer toutes les parts des participations sachant qu'un débit de la *habba* est égal à deux litres par minute.

Tableau 5.19 : Transformation des unités locales (*habba*, *kirat*...) en unité universelle (MKSA)

N°	MAJRAS	Valeur de débit			
		habba	kirat	kirat du kirat	L/S
01	TAKERZIT	30,5	144,25	153,5	73,55
02	SIDI YUCEF	49	97,33	30	106,21
03	AJDOUALA	43,16	223,75	118	105,05
04	ELJDID	32,75	96,82	20	73,63
05	BEN TALEBAHMED	26,25	102,82	60	61,27
06	BERA	19	45	35	41,87
07	BAHMID	7,5	5	3	15,42
08	OULAD JALOUL	16,75	75	56	39,94

CONCLUSION

Après l'analyse des résultats obtenus et leur fiabilité, l'étalonnage de l'instrument de mesure chekfa pour la distribution équitable de la quantité d'eau qui circule dans le système traditionnelle foggara en régime permanent est vérifié par la méthode statistique des moindres carrés. En effet, cette méthode minimise les erreurs entre les valeurs de la habba et ses fractions.

Pour la chekfa d'Ourmoul Tamentit :

- Le coefficient de détermination est très proche de un ce qui explique la linéarité de modèle équation n° 5.7
- Les valeurs de la variable de X (1,54. 2,56. 3,99. 7,1) représentent les valeurs des fractions 1/2habba, 1/3 habba, 1/4 habba ,1/6 habba respectivement et plus ou moins. C'est vérifiable.

Pour la chekfa de licha de la région de Timimoun :

- Le coefficient de détermination est très proche de un ce que explique la linéarité de modèle équation n°.5.7.
- Pour la conformité entre le débit de habba et ses fractions n'est pas vérifiable pour le 1/3 habba et 1/6 habba.

Conclusion générale

En Algérie, la plupart des oasis sont situées sur une ligne nord-sud, sur une pente de dépression (sebkha). La circulation des eaux souterraines se fait d'Est en Ouest. Sur la base de cette circulation que dans les régions de Touat, Gourara, et Tidikelt le système de foggara a été implanté et attesté dès le XI siècle avec l'arrivée des arabes.

Ce système consiste à capter l'eau d'une nappe souterraine située à une certaine distance de l'endroit à irriguer, et à l'y conduire par des canaux souterrains. Et cela en réalisant à l'aide d'une technique spécifique, entre les deux points extrêmes, une pente suffisante pour l'écoulement de l'eau.

Après la détermination de l'endroit où sera creusé le premier puits (*aïne el foggara*), il arrive un moment où l'eau apparaît à la surface et sera partagée entre plusieurs ayants droit. Le partage, c'est d'abord pratiquer l'art de la mesure des parts d'eau. Il s'agit d'une mesure traditionnelle locale.

Au Touat, la mesure se fait au moyen d'une planche de cuivre percée de trous dénommées *chekfa*, l'unité de mesure de l'eau est la *habba*. C'est la quantité d'eau qui s'écoule par un trou d'une dimension donnée pendant 24 heures. Il existe un multiple : 5 *habba* mais surtout une série de sous multiples, qui reflètent l'importance attachée à l'eau par rapport à la *habba*. Ce sont les fractions $1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/12, 1/24$. Le spécialiste chargé de confectionner les *chekfa* et de procéder aux mesures s'appelle le *kiel elma*. Il est désigné par l'assemblée des propriétaires d'eau « djemaa », il est le détenteur du registre de la foggara. Le *kiel elma* occupe une place importante dans la hiérarchie nobiliaire et sociale.

La plaque de mesure traditionnelle *chekfa* a été étudiée par une reproduction des caractéristiques propres en particulier aux dimensions des ouvertures conformes aux prototypes étudiés. Des mesures expérimentales effectuées en laboratoire, pour différentes configurations de hauteurs et d'ouvertures conformes aux méthodologies usitées par les mesures in situ effectuées par le *Kial el Ma*. Les mesures de débits ont été obtenues à partir des sorties de différentes *chekfa* étudiées, représentant un échantillon des instruments de mesure de la région de Touat, Gourara et du Tidikelt. L'utilisation des méthodes statistiques, notamment la régression linéaire sur les valeurs des débits, a permis d'exprimer la relation entre les valeurs représentant le débit de habba et celles représentant les fractions de débit de habba.

Les résultats expérimentaux ont montré dans un premier temps indubitablement la conformité entre les débits d'une haba et les fractions de haba de la chekfa considérée (cas d'école chekfa de Tamentit). Dans un deuxième temps les méthodologies de mesure adoptées par les anciens ont été vérifiées et validé avec ceux du système actuel.

A partir de ces résultats encourageants, il a été vérifié que la restitution exacte des débits d'entrée de la foggara école, celle de Tamentit, pourrait être reproduite entièrement et précisément au travers du Zemam. Ce dernier enregistre par écrit l'ensemble de l'histoire de l'évolution de l'hydrométrie de la galerie de sortie de la foggara étudiée en prenant comme débit de la habba égale à 119,18 litres par heure, et ainsi donner l'ensemble des débits fractionnés de la foggara école

BIBLIOGRAPHIE

- # [1] **A. Djennane 1990** « Constat de situation des zones Sud des oasis algériennes Office Nationale de la Datte (Algérie) » Options Méditerranéennes, Sér. A / n 1 1, - Les systèmes agricoles oasiens
- # [2] **Al-Abri, B. and Al-Bayan Fi Badh (1980)** « Aflaj Oman (in Arabic), Golden Printing Press, Muscat, Oman. » International Network on Water, Environment and Health (UNU-INWEH)
- # [3] **Al-Ghafri, S. Abdullah, Inoue, Takashi, Norman, and W. Ray (1999)** « Water Distribution in Aflaj Irrigation Systems of Oman » In: Proceedings of the annual meeting of the Japanese Society of Irrigation Drainage and Reclamation Engineering (JSIDRE), August 1999, University of Tokyo and Miji University, Tokyo.
- # [4] **Al-Ghafri, Abdullah S., Norman, W. Ray, Inoue and Nagasawa, Tetuaki (2000a)** « Traditional Irrigation Scheduling in Aflaj Irrigation Systems of Oman, Case Study of Falaj Al-Hageer, Northern Oman. » In: Proceedings of The First International Symposium on Qanat, 8-11 May in Yazd, Iran.
- # [5] **Al-Ghafri, Abdullah S., Inoue, Takashi and Nagasawa, Tetuaki, (2000b)** « Aflaj Irrigation Systems of Oman, The Way of Water Distribution » In: Proceedings of The XIV Memorial CIGR World Congress 28 February – 1 December 2000 in Tsukuba, Japan.
- # [6] **Al-Saleemi, Mahfoodh, Abdel Fattah, Nabeel (1997)** « Administration and Organization of Aflaj in the Sultanate of Oman », Analytical Study (in Arabic), Institute of Public Administration, Oman.
- # [7] **Ansari Taha (2006)** « système traditionnel d'exploitation des eaux souterraines foggaras » Agence nationale des ressources hydriques direction régionale ADRAR, ALGERIE
- # [8] **ARRUS.R. (1985)** « L'eau en Algérie, Office des publications Universitaires, Alger » ; *de l'impérialisme au développement (1830-1962)*, Alger OPU.
- # [9] **A. Saïd (1983)** « les systèmes de captage traditionnels dans les oasis sahariennes » Institut National Des Ressources Hydrauliques, Alger ,69p.
- # [10] **Burdon d.J. (1977)** « Flow of fossil groundwater » Q. J. Eng. Géol. Vol.10. 97-124.
- # [11] **Capitaine Lô. (1953)** « Les foggaras du Tidikelt ». Travaux De L'institut Des Recherches Sahariennes 10: 139-181;11: 49-79.

- ✚ [12] **Cornet, 1952** « Essai sur l'hydrogéologie du Grand Erg Occidental et des régions limitrophes foggara ». les travaux de l'I.R.S, Vol. 8, Page 71-122
- ✚ [13] **Costa, P.M. and T.J.Wilkinson (1987)** « The Water Supply of Early Islamic Sohar » Ministry of National Heritage and Culture, Sultanate of Oman, The Journal of Oman Studies , Vol. 9 (1987), pp. 35-42
- ✚ [14] **Faisal Farooq Khan Zarh-Karez (2001)** « A Traditional Water Management System Striving Against Drought, Increasing Population, and Technological Change », *The United Nations World Water Assessment Programme: Side Publications Series* pp. 14-16
- ✚ [15] **FAO-AQUASTAT (2005)**. « Land and water agriculture21. FAO's information System on Water and Agriculture »: Iran. [en ligne]. Rome, FAO. Disponible sur Internet :<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/aquastat/countries/iran/index.stm>
- ✚ [16] **Geopetrole (1964)** « Etude analogique de la nappe du Continental Intercalaire saharien, pour l'org. Mise en valeur sous-sol saharien ». Direction Générale des Ressources en Eau, Tunis
- ✚ [17] **Henri Goblot (1963)** « Dans l'ancien Iran, les techniques de l'eau et la grande histoire », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, Vol. 18, n°3, pp. 499-520
- ✚ [18] **Hofmann Alexia (2007)** « la gestion traditionnelle de l'eau par qanat en iran est-elle compatible avec le concept de la gire? » Disponible sur Internet : <http://www.agroparistech.fr/IMG/pdf/Hofmann.pdf>
- ✚ [19] **Jean Bisson (1990)** « Permanence d'une paysannerie au Sahara algérien :l'exemple des confins du Grand Erg Occidental » Revue options méditerranéennes, CIHEAM,
- ✚ [20] **J.P. Laborde (2007)** « Éléments d'hydraulique générale », Ecole Polytechnique De L'universite De Nice - Sophia Antipolis, 85 P
- ✚ [21] **Karimi S.(2003)** « Qanat as the symbol of the Native Iranians in water harvesting from ground water resources ». Paper presented to the 3rd IWHA conférence in Alexandria. December 1114 2003. Bergen (NO), IWHA.
- ✚ [22] **Kobori I. (1982)** « Case studies of Foggara oases in the Algerian Sahara and Syria ». Rapport n° 2, Université de Tokyo, 45 p.
- ✚ [23] **Lambton A.K.S.(1969)**. « The persian land reform 1962-1966 ». Oxford: Clarendon Press.P 5-12

- ✚ [24] **M. Ould Baba Sy ; M. Besbes (2005)** « Holocene recharge and présent recharge of the saharan aquifers ». A study by numerical modelling
- ✚ [25] **Nesson (c) (1973)** « Structure agraire et évolution sociale dans les oasis de l'Oued Righ » travaux de l'IRS Vol. 24, Page 85-128
- ✚ [26] **Norman, W. R., Shayya, W. H., Al-Ghafri, Abdullah S., (1998a)** « Irrigation Water Costs and Management Practices Among Farms in Northern Oman » journal of Scientific Research, Agricultural Sciences : 1-8.
- ✚ [27] **Norman, W. R., Shayya, W. H., Al-Ghafri, Abdullah S., and McCann, I.R., (1998b)** « Aflaj Irrigation and On-farm Water Management in Northern Oman » irrigation and Drainage Systems 12: 35-38.
- ✚ [28] **Orengo (R) 1951** « les foggaras les irrigations et le divers problemes qui s'y attachent au Gourara » service de la colonisation et de l'hydraulique 1951 alger
- ✚ [29] **Paix (F) 1959** « l'o.R'hir- nappes souterraines et puit artésiens » polletin de la liaison saharienne n°34. Alger
- ✚ [30] **Pierre Kayser professeur-ingénieur, Guy Waringo 2002** « L'aqueduc souterrain des Raschpëtzer, un monument antique de l'art de l'ingénieur au Luxembourg ».), pp. 1-8
- ✚ [31] **P.N.U.D. (1986).** « L'eau et le Maghreb : un aperçu sur le présent de l'héritage et l'avenir », Rapport, 131-143
- ✚ [32] **Qingwei Sun, Tao Wang, Iwao Kobori, and Luohui Liang (2001)**« Karez in the Turpan Region of China » *The United Nations World Water Assessment Programme: Side Publications Serie s* pp. 12-14
- ✚ [33] **Remini B., Achour B. 2008** « Les foggaras du grand erg occidental Algérien » Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 07, Juin 2008, pp. 21-37
- ✚ [34] **Savornin (j) (1947)** « le plus grand appareil hydraulique du sahara »travaux de l'IRS Alger In : [9]
- ✚ [35]. « Sciences au Sud - Le journal de l'IRD - n° 40 - juin/juillet/août 2007 » pour khettera en Maroc
- ✚ [36] **sofreten (1963)** « Alger Etude de fonctionnement et possibilités d'amélioration »
- ✚ [37]**Sutton, S. (1984)** « The Falaj a Traditional Co-Operative System of Water Management » Waterlines *The United Nations World Water Assessment Programme: Side Publications Series In* [26]

- ✚ [38] **Urumuqi (1990)** « Turpan Chronicles. Xinjiang People's Publication House ». Urumuqi, China. In [32]
- ✚ [39] **UNESCO (1972)** « Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional » , Rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris (1972).
- ✚ [40] **Wahby, H. and S. Al-Harthi (1995)** « General Controlled Irrigation Systems for Optimum Use of Water in falaj Keed at Bahla Saud » In: Proceedings of Sultanate of Oman International Conference on Water Resource Management in Arid Countries, Ministry of Water Resources, Oman: 9-15
- ✚ [41] **Wilkinson, J.C. (1977)** « Water and Tribal Settlement in Southeast Arabia: a Study of the Aflaj of Oman » Oxford, Clarendon Press.