

Annexe B Réhabilitation des Khettaras

Annexe B Réhabilitation des Khettaras

Table des Matières

	Page
B.1 Condition actuelle des khettaras	B - 1
B.1.1 Présentation des Khettaras.....	B - 1
B.1.2 Distribution des khettaras	B - 3
B.2 Les ressources en eau.....	B - 8
B.2.1 Général	B - 8
B.2.2 Les aménagements du barrage.....	B - 8
B.2.3 Seuils de dérivation	B - 8
B.2.4 Stations de pompage.....	B - 9
B.3 Mesure des débits des khettaras.....	B -10
B.3.1 Objectif.....	B -10
B.3.2 Observations sur les mesures de débit.....	B -10
B.4 Inventaire des réhabilitations	B -16
B.4.1 Réalisation des travaux de réhabilitation par l'ORMVA/TF.....	B -16
B.4.2 Programme d'aide à petite échelle.....	B -17
B.5 Travaux de réhabilitation des khettaras	B -17
B.5.1 Contraintes des khettaras existantes	B -17
B.5.2 Réhabilitation des khettaras.....	B -19
B.6 Collecte de données pour le planning des ouvrages de recharge	B -32
B.6.1 Généralité	B -32
B.6.2 Plan des ouvrages de recharge.....	B -32
B.6.3 Collecte et classification des données.....	B -33
B.6.4 Investigations pour les barrages de recharge	B -40
B.6.5 Investigation pour une cuvette de recharge	B -43

Tables

Tableau B.1.1	Délimitation de chaque zone
Tableau B.2.1	Relevé des eaux de retenue du barrage Hassan Addakhil
Tableau B.2.2	Bilan hydrique du barrage Hassan Addakhil
Tableau B.2.3	Caractéristiques des stations de pompage gérées par les coopératives et les associations
Tableau B.2.4	Données des puits d'eau potable
Tableau B.3.1	Mesure de débit des 30 Khettaras
Tableau B.4.1	Liste des khettaras réhabilitées par PDRT
Tableau B.4.2	Travaux de réhabilitation de ORMVA/TF
Tableau B.4.3	Réhabilitations par le programme d'aide au niveau local du Japon
Tableau B.6.1	Caractéristiques générales des sites de barrages proposés
Tableau B.6.2	Données d'investigation sur le terrain des khettaras des secteurs Jorf et Hannabou

Figures

Figure B.1.1	Répartition des Khettaras
Figure B.1.2	Débit des Khettaras (Zone A)
Figure B.1.3	Débit des khettaras (Zone B, C)
Figure B.1.4	Débit des Khettaras (Zone D)
Figure B.1.5	Débit des Khettaras (Zone E)
Figure B.1.6	Débit des Khettaras (Zone F)
Figure B.1.7	Débit des Khettaras (Zone G)
Figure B.2.1	Relevés de sctockage du barrage Hassan Addakhil
Figure B.2.2	Schéma (Bassins des oueds Guir et Ait Aissa)
Figure B.2.3	Schéma (Bassins des oueds Ziz et Gheris)
Figure B.2.4	Système de dérivation du secteur Goulmima
Figure B.2.5	Système de dérivation du secteur Tinejdad
Figure B.2.6	Système de dérivation du secteur Jorf
Figure B.2.7	Stations de pompage construire par le PDRT
Figure B.2.8	Zone d'étude pour l'emplacement des pompes (eau potable)
Figure B.2.9	Puits d'alimentation en eau potable
Figure B.3.1	Emplacement des Khettaras pour les mesures de débit
Figure B.3.2	Mesure des débits de 30 Khettaras
Figure B.3.3	Répartition des débits le long de la galerie
Figure B.3.4	Pertes par fuites
Figure B.4.1	Raéhabilitation des khettaras avec les pragrammes d'aide au niveau local
Figure B.6.1	Emplacement des sites d'observation des nappes
Figure B.6.2	Niveau de la nappe sur les sites d'observation
Figure B.6.3	Emplacement des 30 Khettaras pour la mesure du débit
Figure B.6.4	Débit des khettaras (observation journalière)
Figure B.6.5	Conductivité des nappes aux stations de pompage de l'eau potable
Figure B.6.6	Emplacement et présence d'eau des khettaras de Jorf - Hannabou

B.1 Condition actuelle des khattaras

B.1.1 Présentation des Khettaras

La khattara est un système traditionnel de mobilisation des eaux souterraines ou du lit (en sous-sol) des oueds vers le village sur une longue distance à travers un petit tunnel (galerie) qui a été creusé par l'homme en sous-sol. Les khattaras, qui ont plusieurs milliers d'années, ont été introduites aux pays du Maghreb par l'Iran. Ce système de transport d'eau est appelé "qanat" en Iran, "karez" dans et aux alentours du Pakistan et en Afghanistan, "foggara" dans et aux alentours des pays de Oman à l'Algérie. Les khattaras sont largement distribuées au Maroc, et en particulier dans la région de Tafilalet, selon le recensement en 1967. Dans cette région, seules 410 khattaras sont encore reconnues productives, et les 160 khattaras autres sont abandonnées à cause de la sécheresse qui sévit depuis les années 70.



Diffusion des Khettaras

L'eau de la khattara est utilisée aussi bien comme eau domestique que pour l'irrigation. Le volume d'eau fournit par la khattara a été réduit au point que de grandes superficies de culture ont du être abandonnées, bien que l'eau soit utilisée avec modération et efficacité par les habitants.

Etant donné que les eaux souterraines des khattaras sont réduites et facilement influencées par une légère instabilité du niveau de la nappe phréatique, les agriculteurs ont depuis tous été obligés de faire des travaux de maintenance continus tels que le creusement de la galerie pour préserver son débit au cours des siècles.

On peut dire que sont système de mobilisation d'eau par gravité, est un système plus doux et cohérent avec la nature que le moto pompage, en conséquent il s'avère une méthode plus acceptable pour utiliser avec prudence et efficacité l'eau souterraine.

Puisque les khattaras sont situées dans les régions arides et semi- arides, une instabilité de la quantité des précipitations annuelles affecte considérablement leur débit. Plusieurs khattaras dans la région sont devenues sèches ou leur débit a remarquablement diminué principalement à cause de la diminution du niveau de la nappe phréatique due à la sécheresse continue depuis 1997. En conséquent, 191 khattaras

parmi les 410 khattaras sont productives, tandis que d'autres ne sont pas utilisées à cause de la diminution de la nappe phréatique ainsi que les lourdes charges des travaux de maintenance. En plus, le passage de l'exploitation des sources d'eau de la khattara au pompage a accéléré la détérioration du système d'utilisation d'eau, autrefois constitué seulement des khattaras. Le volume d'eau des 191 khattaras a été estimé à environ 36 Mm³ par an, et ce volume est plus important que celui stocké dans le barrage Hassan Addakhill qui a été de 26 Mm³ en 2002. Puisque l'eau écoulee depuis la khattara est stable et en meilleure quantité par rapport aux barrages tributaires de précipitations, il est essentiel de les entretenir pour améliorer la vie rurale et à la productivité agricole continue dans la région de Tafilalet. Le diagramme schématique est illustré comme suit:

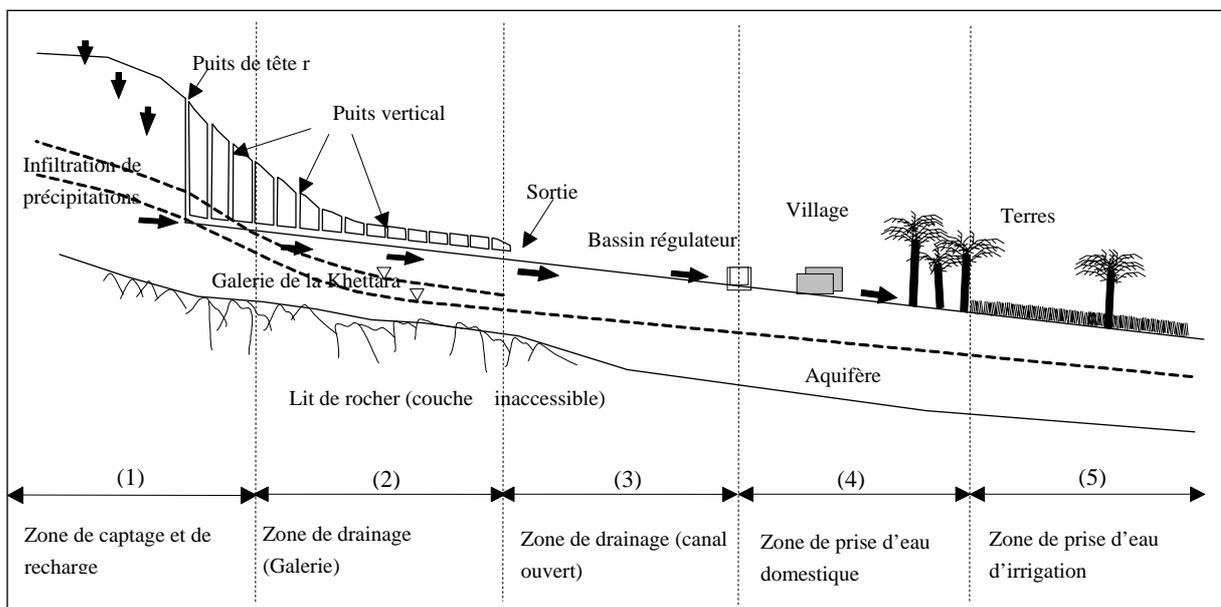


Schéma simplifié d'une khattara

- (1) la zone de captage est située en amont de la khattara. Les précipitations ou les eaux de crues s'infiltrent dans la terre, et jaillissent en tant que sources dans la galerie de la khattara généralement à travers des couches de gravier et de sable. Plusieurs khattaras sont situées dans le soubassement rocheux et en amont de la galerie pour recueillir l'eau des fissures. La galerie du type collectrice est aussi appliquée pour la collecte effective des eaux du lit de rivière (eau du sous-sol).
- (2) la zone d'acheminement des eaux (galerie) est immédiatement située en aval de la zone (1). Puisque le niveau d'eau est plus bas que celui de la galerie de base, les infiltrations (fuites) des eaux de la khattara sont observées principalement dans cette zone, et surtout depuis que la fondation est composée des couches de graviers et de sable.
- (3) La zone de captage (canal ouvert) se trouve là où la galerie est localisée dans une profondeur superficielle. La galerie dans cette zone est couverte par des dalettes bétonnées ou par des

rochers de plaine pour éviter l'amoncellement de sable dans la galerie. Plusieurs galeries dans cette zone sont actuellement réhabilitées en béton ou en maçonnerie.

- (4) la zone de prise d'eau domestique est située dans et autour des villages. L'eau est utilisée comme eau potable et pour fournir l'eau des ménages. C'est pour cette raison qu'on a placé des canaux en béton dans presque toutes les khattaras.
- (5) La zone de prise d'eau pour l'irrigation (canal d'irrigation): est étendue vers la zone agricole. La plupart des khattaras possèdent un bassin régulateur pour contrôler l'eau d'irrigation, principalement la stocker.

B.1.2 Distribution des khattaras

L'ORMVA/TF couvre une superficie de 77,250 km² dans la province d' Errachidia et Figuig, dans laquelle 60.000 ha sont irrigués par les eaux des khattaras et de crues. Il est défini dans le rapport d'étude qu'il existait 570 khattaras dans les provinces, néanmoins 160 se sont asséchées depuis les années 70s comme c'est expliqué dans le sous chapitre B.1.1. A cet effet, 410 khattaras sont définies comme khattaras « productives », et 160 khattaras sont "abandonnées ". En plus, 410 khattaras productives sont catégorisées en deux groupes, l'un comprend celles qui ont actuellement un débit, et les autres qui se sont récemment asséchées. Cependant, elles possèdent le potentiel de produire un débit lorsque le sous-sol est alimenté par les précipitations adéquates. Les premières sont au nombre de 191 khattaras et sont appelées khattaras productives, et les dernières sont au nombre de 219 khattaras définies comme khattaras reproductives dans le rapport.

Les khattaras qui sont situées dans et autour de la région de Tafilalet sont montrées dans la figure B.1.1. Ces khattaras sont délimitées par des conditions topographiques et géo hydrologiques comme le montre le tableau B.1.1.

Répartition des Khettaras par zones

Zones	Commune Rurale	Total des Khettaras	Khettaras Productive	Bassin versant
A	Goulmima, Tinjdad	137	80	Gheris et Todrhariver
B	Beni-Tadjit, Gourrama	24	20	River de Guir
C	Boudenib	8	8	River Guir
D	Fezna, Jorf, Arab-Sabbah-Gheris	69	21	Rive droite de la rivière de Gheris
E	Sifa	25	14	Rive droite de la rivière de Gheris
F	Rissani, Taouz	44	11	Aval de la rivière du Ziz
G	Alnif	103	37	Rivière du Maider
Total		410	191	

Ce qui suit sont des informations fondamentales sur ces khattaras:

- 1) Nombre de khattaras: Presque 60 % des khattaras sont situées dans la zone A et G. La plus part des khattaras dans la zone A sont situées dans les bassins versants des

oued Gheris et Todrha qui reçoivent les eaux souterraines depuis la chaîne du Grand Atlas.

- 2) Débit de khattaras: le débit total des 191 khattaras productives est estimé à $1.1 \text{ m}^3/\text{sec}$ selon les mesures de débit au début de l'an 2005.

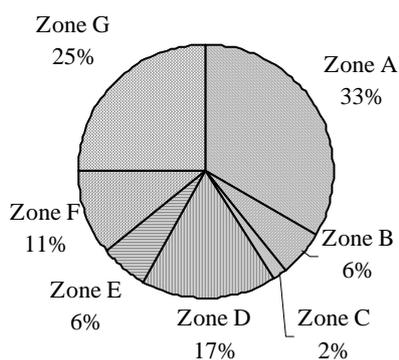
Comparé au débit moyen de 4.5 lit/sec de toutes les khattaras productives, les khattaras dans la zone B et C ont un flux adéquat puisque la zone B est géographiquement composée dans une zone pluviale et la plupart des khattaras sont situées le long des rives des rivières de Guir et Bouanane ou ces affluents. Les khattaras dans les zones D et E possèdent un grand débit de 11 to 13 lit/sec. Contrairement aux khattaras dans les zones F et G qui ne possèdent qu'un petit débit de 2,0 à 2,3 lit/sec comparé au débit moyen de 5,7 lit/sec. Il peut donc être conclu que la quantité des eaux souterraines fournie à la zone de captage des khattaras des zones D et E depuis les rivières Gheris et Todrha est relativement importante. Bien que les khattaras de la zone F soient situées en aval du bassin versant de la rivière de Ziz, la diminution des crues, qui alimentent constamment la nappe à partir du lit de la rivière, a provoqué une diminution de l'eau écoulée dans les khattaras. Pas loin de ces zones, le flux de la khattara est minimisé dans la zone G à cause du manque de précipitations en plus du petit tournant de chaque khattara.

- 3) Longueur de la khattara: La longueur de la khattara reflète les caractéristiques topographiques et géo hydrologiques de chaque zone. Par exemple, les khattaras des zones A, B et G sont caractérisées par une courte longueur d'environ 1.300 à 2.500 m si on les compare à la longueur moyenne de 3.200 m de toutes les khattaras, puisque ces zones sont localisées dans une zone montagneuse. Contrairement à celle la, les khattaras dans les zones C, D, E et F possèdent une longueur plus longue d'environ 4.900 m ou plus, car ces khattaras sont situées en aval des bassins versants des rivières de Gheris, Ziz et Guir et les galeries des khattaras sont étendues dans la sous surface des couches perméables de gravier et de sable.

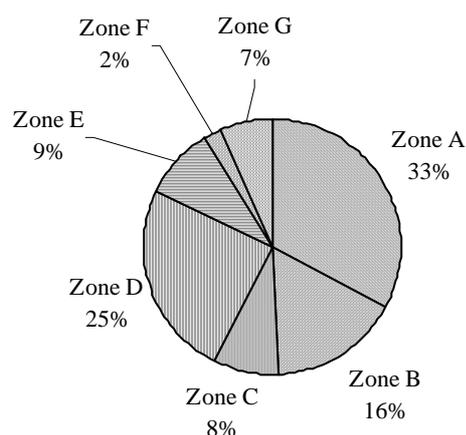
Caractéristiques générales des khetaras par zone

	No. de Khetaras Productives	Débit total (lit/sec)	Débit moyen (lit/sec)	Longueur		
				Longueur total (m)	Longueur moyenne (m)	
Zone A	137	80	359	4.5	221,351	1,616
Zone B	24	20	179	8.9	32,178	1,341
Zone C	8	8	93	11.6	46,650	5,831
Zone D	69	21	270	12.8	384,403	5,571
Zone E	25	14	96	6.9	159,722	6,389
Zone F	44	11	25	2.3	215,550	4,899
Zone G	103	37	73	2.0	252,580	2,452
Total	410	191	1,094	5.7	1,312,434	3,201

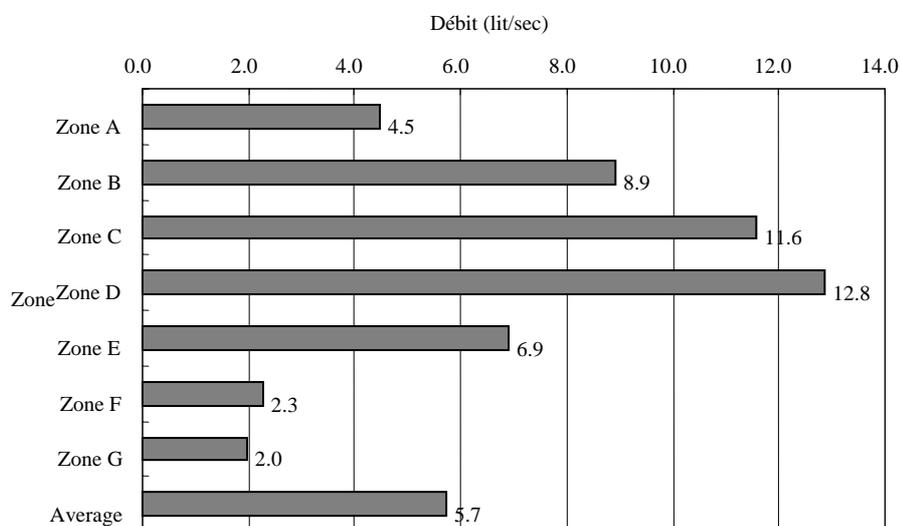
Nombre de Khetaras

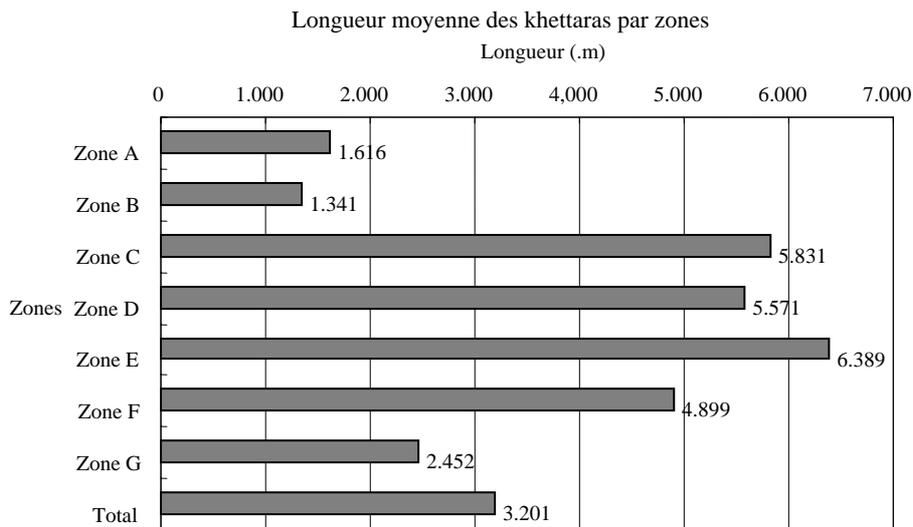
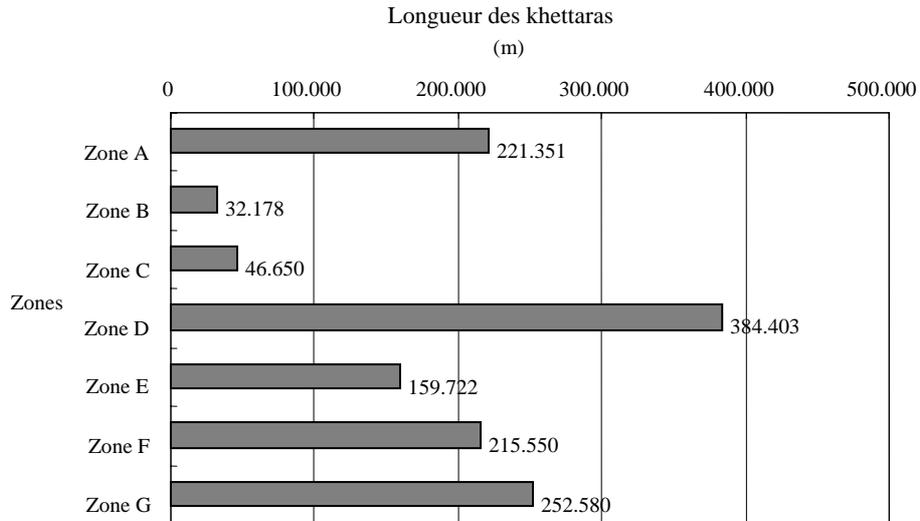


Débit de khetaras par zone



Débit moyen des khetaras





La répartition des khetaras et de leur débit est tracée dans chaque zone par le symbole sur les figures B.1.2 à B.1.7. Voici quelques caractéristiques de la répartition des khetaras.

- 1) Zone A: dans la zone A, les khetaras sont réparties sur cinq zones (5), notamment les zones de Tinejdad, Mellaab, Ait Hani - Aghbalou, Assoul et Amellago. Les zones d'Ait Hani - Aghbalou, Assoul et Amellago sont situées dans la zone montagneuse (le Grand Atlas) et la plus part des khetaras ont un flux perpétuel. Dans la zone de Tinejdad, plusieurs khetaras le long de la rivière de Todrha ont récemment asséché à cause de la régression du niveau de la nappe phréatique. Pourtant les khetaras au long de la rivière de Tanguerfa et celle situées en aval des dépôts de la rivière des gorges de Timkit possèdent un débit relativement grand de 5 à 10 lit/sec. Les khetaras qui sont situées le long de la rivière de Tourhach originaire de la chaîne de l'Anti Atlas

sont aussi bien maintenues, malgré cela la sécheresse ininterrompue cause une diminution du flux des khattaras. Dans la zone de Mellaab, les khattaras sont situées dans les rives gauche et droite de la rivière de Ferkla. Les khattaras situées sur la rive gauche ont leur zone de captage en aval des gorges de Timkit et de la rivière de Gheris. Les khattaras situées sur la rive droite sont situées parmi plusieurs affluents de la rivière de Ferkla. Plusieurs khattaras ont asséché à cause des sécheresses continues. (Se référer à la figure B.1.2)

- 2) Zone B: IL y a 24 khattaras le long des rivières d'Ait Aissa et Bouanane de l'amont à l'aval, et sur la rivière de Guir en aval de la zone B. parmi ces 24 khattaras, 20 sont actuellement productives. Plusieurs khattaras le long de la rivière d'Ait Aissa, parmi les quelles l'aval de la galerie de khattara est installée dans la lit de la rivière, ont un débit de plus de 15 lit/sec. Une galerie collectrice a été construite pour la collecte effective d'eau à Ain Chouater. (Se référer à la Figure B.1.3)
- 3) Zone C: Toutes les khattaras dans la zone C sont productives par le même raisonnement que celui de la zone B. Les khattaras sont construites dans la zone inondable de la rivière de Guir qui est composée de gravier et de sable. (Se référer à la Figure B.1.3)
- 4) Zone D: la plus part des khattaras sont situées sur la rive droite de la rivière de Gheris dans la zone D. Dans cette zone, les khattaras sont localisées légèrement en parallèle comme le démontre la Figure B.1.4. Les khattaras situées au nord de Fezna et Jorf sont asséchées depuis 20 ou 30 ans à cause de l'épuisement de la nappe par pompage. L'ensemble de 21 khattaras qui presque au tiers (1/3) du nombre total de khattaras dans la zone sont actuellement productives. Les khattaras productives sont situées depuis la zone de Jorf jusqu'à la zone de Hannabou. Le débit des khattaras adjacentes l'une à l'autre est différent à cause de la différence de la profondeur de puits de tête, la longueur de la galerie, la variation de perméabilité des aquifères, profilage longitudinal, etc., pourtant le flux est perpétuel dans toutes les khattaras. (Se référer à la Figure B.1.4)
- 5) Zone E: Toutes les khattaras sont situées sur la rive droite de la rivière de Gheris dans la zone E. L'ensemble de 14 khattaras parmi les 25 khattaras sont actuellement productrices. Les khattaras sont définitivement réparties selon leurs débits en deux groupes, notamment les khattaras ayant un débit adéquat de plus de 10 lit/sec et celles avec un débit minimal de moins de 2.0 lit/sec. Il est assumé que la différence de leurs propres travaux de maintenance cause un débit variable, en particulier dans la zone des dunes de sable (Se référer à la Figure B.1.5)
- 6) Zone F: la plus part des khattaras sont tarées à l'exception de la khattara Haroun, comme le montre la Figure B.1.6. La khattara de Haroun aussi possède un petit débit, et ainsi les habitants du village dépendent d'autres ressources d'eau tel que l'approvisionnement en eau potable par l'ONEP. L'eau souterraine obtenue par l'aquifère superficiel n'est pas assez suffisante pour l'irrigation, en plus l'eau souterraine salée du profond aquifère est aussi inconvenable à l'irrigation.

Il y a 8 khattaras à Taouz. Ces khattaras sont aussi bien maintenues que leurs flux durable convient à la vie actuelle des habitants (Se référer à la Figure B.1.6)

- 7) **Zone G:** La Zone G (zone d'Alnif) est répartie en quatre zones; notamment la zone de la rivière de Timzaker –OuAdil, la zone de la rivière Tinifit, Reg – la zone de la rivière de Fezzou et la zone de Ahssia. Il existent 103 khattaras, néanmoins seulement 37 khattaras sont actuellement fonctionnelles. Comme c'est démontré sur la figure B.1.7, plusieurs khattaras en aval du bassin versant de la rivière de Reg et presque toute la zone du bassin versant de la rivière de Ahssia sont actuellement asséché. Le débit de khattara est instable à cause de petites quantités de précipitations, particulièrement les khattaras situées le long de la rivière de Reg qui asséchaient du mois de mai en mois d'octobre. Exceptionnellement, la khattara d'Aachich, située sur Hsia possède un débit adéquat de plus de 10 lit/sec durant toute l'année à cause de la suffisance d'eau écoulée depuis le lit de la rivière à sa zone de captage tout au long de la rivière de Ahssia. (Se référer à la Figure B.1.7)

B.2 Les ressources en eau

B.2.1 Général

La région de Tafilalet est composée en gros de quatre (4) bassins versants (Ziz, Gheris, Guir et Maider). Le barrage Hassan Addakhil a été construit au nord de la ville d'Errachidia sur le bassin versant de Ziz. Plusieurs barrages de dérivation ont été construits dans chaque bassin versant pour transporter les eaux de crues vers les terrains agricoles.

B.2.2 Les aménagements du barrage

Le barrage de l'Hassan Addakhil a été construit en 1971 au nord des gorges de la rivière de Ziz avec sa capacité de retenue effective enfermée de 346 Mm³. L'eau de la rivière de Ziz coulait sans entrave dans le bassin de Tafilalet et fournissait la principale source d'eau d'irrigation. Les enregistrements de stockage sont démontrées sur la Figure B.2.1 et les tableaux B.2.1 et B.2.2. Les lâchers du réservoir sont transportés a travers des canaux d'irrigation. L'eau de la retenue contribue à l'irrigation d'environ 9.400 ha, plus de 75 % de l'ensemble de la terre arable actuellement utilisée dans les zones d'Erfoud et Rissani de la plaine de Tafilalet.

Le capacité moyenne de stockage depuis 1971 jusqu'à 2003 est estimée au environ de 72 Mm³ et elle est équivalente à 20 % de la capacité effective de stockage du réservoir. La sécheresse ininterrompue depuis 1997 a actuellement diminué la superficie irriguée dans la plaine de Tafilalet.

B.2.3 Seuils de dérivation

Il existe plusieurs seuils de dérivation le long des oueds et des affluents du Ziz, du Gheris et du Guir. Ils servent à dériver l'eau des crues vers des périmètres d'irrigation situés en aval. Les plus grands d'entre eux, ceux de Moulay Brahim, Lahmida et Elbrouj sont situés le long des oueds Gheris et Zis. Les deux premiers

dérivent l'eau du Gheris vers le bassin du Ziz. Le seuil de Elbouj est situé au nord de Erfoud et dérive les eaux du Ziz sur les périmètres irrigués de la zone Erfoud.

Les volumes de dérivation de ces seuils sont indiqués au tableau ci-dessous. Au cours de l'année 2003-2004, les volumes réels étaient d'environ 107 Mm³ pour les trois réunis, le taux de dérivation de 23 %.

Volume de dérivation des trois seuils (2003 - 2004)

Zone irriguée	Surfaces irriguées (ha)	Volume de dérivation (Mm ³)	Taux de dérivation (%)
Oued Ziz et zone d'installation	5,500	31	38
Plaine du Tafilalet	22,400	76	15
Total	27,900	107	23

Source: Rapport de Gestion, ORMVA/TF

Les seuils de dérivation des bassins du Guir ainsi que les oueds Guir et Ziz sont indiqués sur les figures B.2.2 et B.2.3. De plus, les principaux barrages de dérivation et leurs canaux de distribution de l'eau qui dérivent les crues pour irriguer les zones de Goulmima, Tinejdad et Jorf sont montrés sur l'image satellite (Voir figures B.2.4 à B.2.6).

B.2.4 Stations de pompage

(1) Stations de pompage communales

L'ORMVA/TF possède 114 stations de pompage communales, et selon cette administration, le nombre de pompe privées atteindrait aujourd'hui le chiffre de 6 700 dans le Tafilalet. Les stations de pompage sont exploitées et entretenues sous la responsabilité des coopératives et associations. La liste des stations de pompage est donnée au tableau B.2.3 L'ORMVA a commencé à installer ces pompes au début des années 70, recommandant largement leur construction depuis 1983 pour faire face à la sécheresse qui a début en 1981. Sur l'ensemble de ses stations de pompage, 114, soit 60 % sont bien entretenues et fonctionnent correctement, les autres 40 % sont mal exploitées du fait du mauvais entretien (manque de pièces par exemple).

La Figure B.2.7 montre l'emplacement des stations de pompage communales du projet de développement rural du Tafilalet PDRT, financé par le FIDA, la BID et les administrations locales.

(2) Stations de pompage de l'eau potable

Les puits utilisés pour l'eau potable sont indiqués au tableau B.2.4 (ceux de la zone d'étude sont indiqués à la figure B.2.8), et leur emplacement est localisé à la figure B.2.9.

B.3 Mesure des débits des khattaras

B.3.1 Objectif

Les khattaras sont dispersées dans le Tafilalet, et situées dans un environnement météorologique, hydrogéologique, géologique et autres, très différent. Concernant les conditions météorologiques par exemple, il pleut davantage au nord (zones B et C) du fait qu'elles sont plus élevées, avec des maxima de précipitations de 176 mm enregistrés à Amounguer dans la chaîne du Haut Atlas. En revanche, ils ne dépassent pas 50mm à Erfoud et Taouz, au sud de la zone d'étude dans la plaine du Tafilalet près de l'Algérie. Du point de vue de l'hydrogéologie, certaines khattaras sont situées dans les aquifères des anciennes zones inondées en aval des grands bassins de l'oued, d'autres dans la fondation rocheuse à la recherche des eaux de fissures, d'autres encore dans les dépôts fluviaux à la recherche des eaux du lit de la rivière (en sous-sol) par l'intermédiaire d'une galerie de captage en travers de l'oued.

Les mesures de débit ont été entreprises trois (3) fois en juin et septembre 2003 et en février 2004. Elles avaient pour but de vérifier les fluctuations saisonnières de 30 khattaras sélectionnées (voir figure B.3.1). Outre les mesures de fluctuation des débits saisonniers, les mesures ont été faites en trois (3) ou cinq (5) sections à l'extrême amont, au centre et à l'extrême aval des khattaras pour relever la répartition des débits le long de la galerie, par exemple les sections d'écoulement et les sections de fuites, le taux de fuite, etc.

B.3.2 Observations sur les mesures de débit

Les résultats de mesure des 30 khattaras sont donnés au tableau B.3.1 avec les caractéristiques d'analyse en terme de 1) fluctuations saisonnières 2) les sections d'écoulement et les sections de fuites, et 3) taux de fuite. Les points clarifiés par l'analyse des mesures sont les suivants :

(1) Fluctuations saisonnières

Les débits observés sur des sections particulières sont reportés à la figure B.3.2. Il pleut entre octobre et février dans la zone d'étude, et donc sur la plupart des sites, les débits augmentent en février. Pourtant cette tendance n'a pas été observée sur la khattara de la zone Alnif (zone G) car il a plu très peu cette année là dans le sud de la zone d'étude. Dans la zone D, Jorf, Monkara, Bouya et Hannabou, le débit était pratiquement constant tout au long de l'année. On présume que le niveau piézométrique des aquifères étalés sur une grande zone n'est pas très sensible aux fluctuations saisonnières des pluies et aux crues.

(2) Sections d'écoulements et sections de fuites

En principe, la galerie des khattaras est divisée en deux sections : la section d'écoulement et la section de fuite, sauf sur les parties revêtues d'un matériau de type béton, mortier ou terre argileuse. La distribution des débits de khattaras est indiquée à la figure B.3.3 (1) et (2). La figure (1) représente les longueurs réelles dans l'axe x, la figure (2) représente les longueurs converties en unités de 1,0 (100 %) dans l'axe x pour permettre une comparaison simple le taux d'écoulement et de fuite tout au long de la galerie.

La forme de distribution est classée comme suit en fonction des fluctuations des écoulements le long de la galerie :

1. Section écoulement en amont (Catégorie 1)
2. Section écoulement entre l'amont et la partie médiane (Catégorie 2)
3. Section écoulement le long de la galerie (Catégorie 3)

Catégorie 1: Section écoulement située le plus en amont de la galerie. D'importantes pertes par fuite sont observées dans plusieurs khettaras. Cette section se retrouve sur les khettaras longues de la zone D et E (Jorf et Sifa).

Catégorie 2: Environ 20 khettaras rentrent dans cette catégorie sur les 30. La figure B.3.3(2) indique qu'une section écoulement s'étend sur 40 % de la longueur en amont, et que les fuites s'observent sur la section aval de la galerie.

Catégorie 3: Les khettaras de la catégorie 3 sont situées sur des petits affluents de la région collinaire. Elles sont construites dans les sous-sol du lit de l'oued. La galerie est parallèle à la surface du lit de la rivière, qui coule continuellement dans la galerie. Par conséquent, le débit de la khettara augmente sur la longueur de galerie.

La forme de distribution du débit le long de la galerie des khettaras est influencée par les conditions hydrogéologiques telles que la répartition des couches perméables, le niveau piézométrique, le seuil d'écoulement des nappes.

(3) Pertes par fuites

Les données des débits observés en juin et septembre 2003 et février 2004 pour les catégories 1 et 2 ont permis d'évaluer les pertes par fuites. Comme nous le voyons à la figure B.3.4, elles varient énormément entre des pertes très importantes et des pertes très faibles. On peut donc légitimement s'attendre à ce que les débits les plus importants aient des « périmètres mouillés » plus longs (la longueur de contact noyé entre un filet d'eau et le canal), et donc des pertes plus importantes. Dans cette hypothèse, nous avons pris les valeurs de débit indiquées à la figure B.3.4 pour trier et relever les données d'observation. Le résumé des estimations est indiqué au tableau suivant :

Pertes par fuites par unité de longueur (km)

(unité : lit/sec/km)

Période d'observation	Ensemble	10 lit/sec < Q	5 < Q < 10 lit/sec	Q < 5 lit/sec
Juin 2003	1.5	1.9	1.4	1.0
Septembre 2003	1.4	2.3	1.5	1.0
Février 2004	1.8	1.8	3.3	2.9
Moyenne	1.6	2.0	2.1	1.6
Fuites prises en compte*	---	2.5	2.0	1.5

Note: * Fuites prises en compte dans l'analyse coûts/bénéfices des travaux de réhabilitation

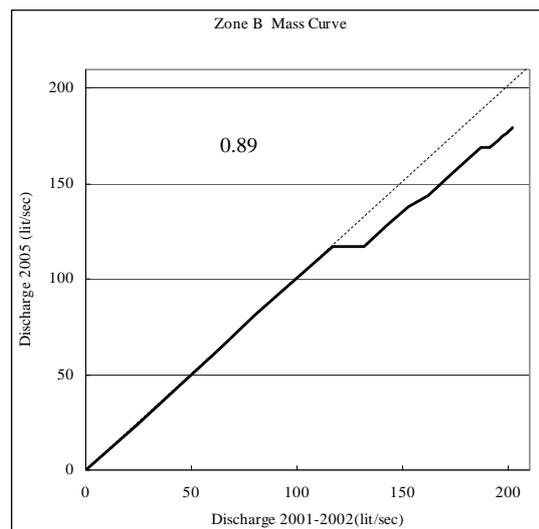
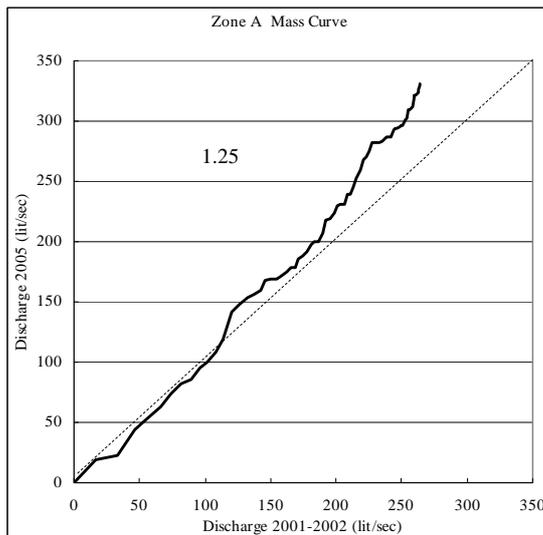
A partir des estimations de ce tableau, nous avons évalué les pertes en fonction des facteurs additionnels suivants (pertes prises en compte dans le tableau ci-dessus), qui se rapportent au calcul des bénéfices du projet de réhabilitation des khetaras.

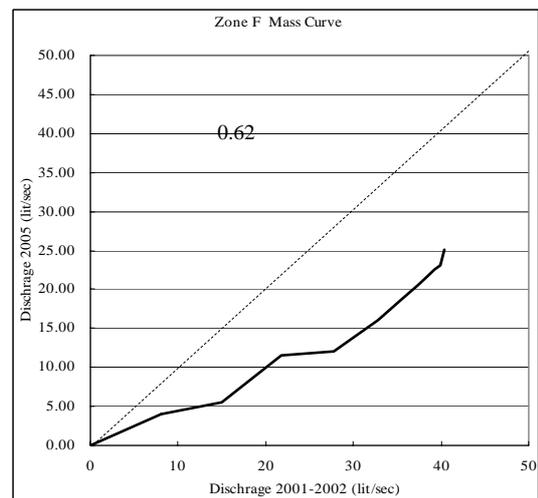
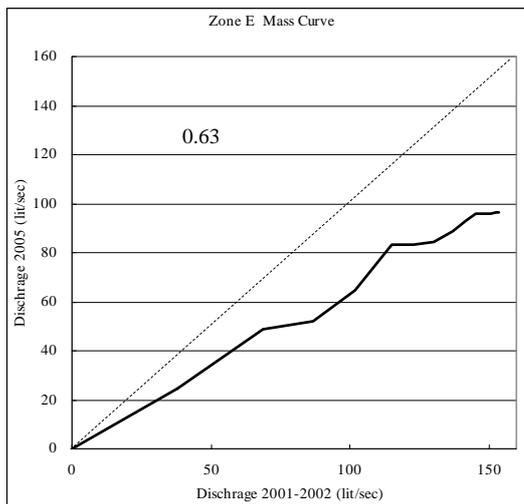
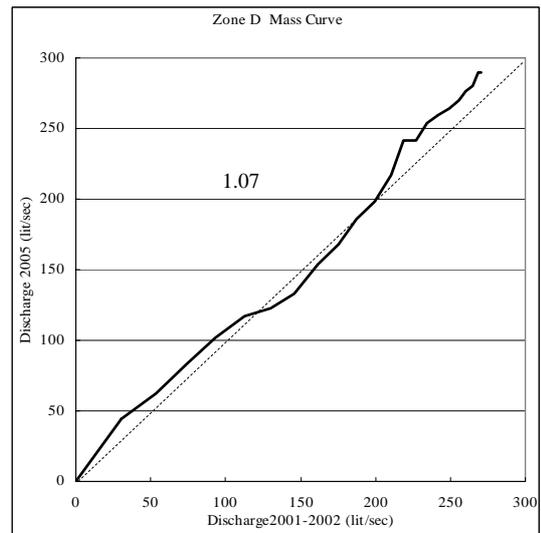
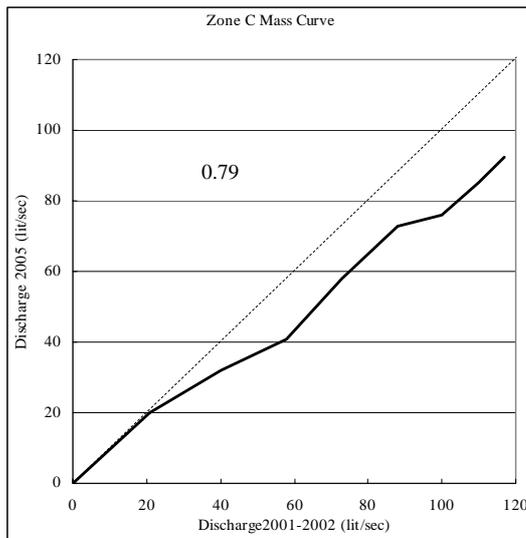
1) Le débit des khetara observés au cours des années 2003 et 2004 ont baissé à cause de la sécheresse qui sévit depuis 1997. Lorsque le débit est rétabli à la suite de pluies normales, des fuites importantes correspondant à l'augmentation du débit risque de se produire. En d'autres termes, il faut considérer des pertes importantes par fuites lorsqu'on évalue les bénéfices obtenus de la réduction des pertes engendrée par les travaux de réhabilitation.

2) Les pertes par fuites ne sont pas constantes entre les sections mesurées. Elles fluctuent et se concentrent particulièrement sur les sections de plusieurs centaines de mètres. Il est possible d'appliquer les valeurs les plus fortes et non les valeurs moyennes de pertes par fuite car les travaux de réhabilitation des khetaras sont entrepris en premier sur les parties qui présentent des fuites importantes, afin de maximiser les bénéfices du projet.

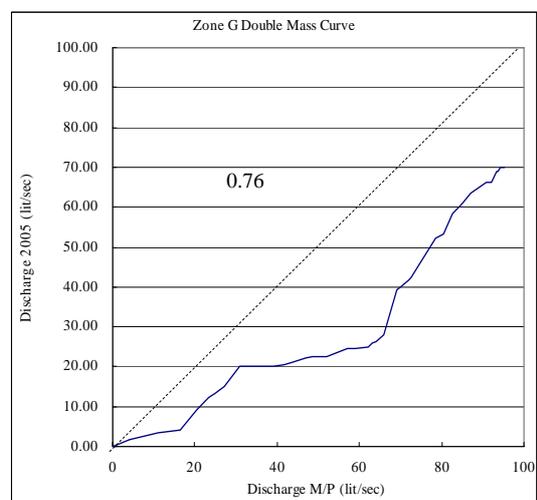
(4) Fluctuation du débit sur une période plus longue

On ne dispose pas des débits de la dernière décennie. Les débits observés pendant la période 2001-2002 et au début de 2005 sont tracés ci-après sous forme de courbe cumulative par zone.





Le tracé de la courbe cumulative est en ordre descendant du débit de la khattara entière. Elle montre que le débit total des khattaras observé au début de 2005 a diminué de 88 % par rapport à celui observé entre 2001 et 2002 à cause de la diminution des khattaras sur les zones E, F et G. Le taux de diminution a atteint 62 % à 76 % du fait que ces zones sont situées au sud de la zone d'étude ou les pluies sont rares comparativement à la zone nord, atteignant à peine 50 à 80 mm par an. De plus la zone de drainage couvre à peine quelques dizaines de km², ce qui augmente encore les réductions de débit dans cette période de sécheresse continue. Il ne faut pas non plus négliger l'impact des autres facteurs, les facteurs



sociaux par exemple, sur la diminution des débits, car ils ont provoqué l'abandon de plusieurs khettaras, suite aux difficultés de financer les frais d'entretien.

(5) Données de débit appliquées à l'évaluation du projet

La politique fondamentale du Plan directeur s'appuie sur la réhabilitation égalitaire des khettaras, tant financièrement que physiquement, afin de donner des chances égales d'accéder aux travaux de réhabilitation entrepris par les agences gouvernementales. Aucune priorité n'est donnée à des khettaras en particulier, même si elles sont économiquement plus avantageuses. La viabilité économique des travaux de réhabilitation est considérée par rapport à l'ensemble des khettaras et des communautés. Les coûts et bénéfices du projet sont évalués pour le total des travaux de réhabilitation de chaque khettara.

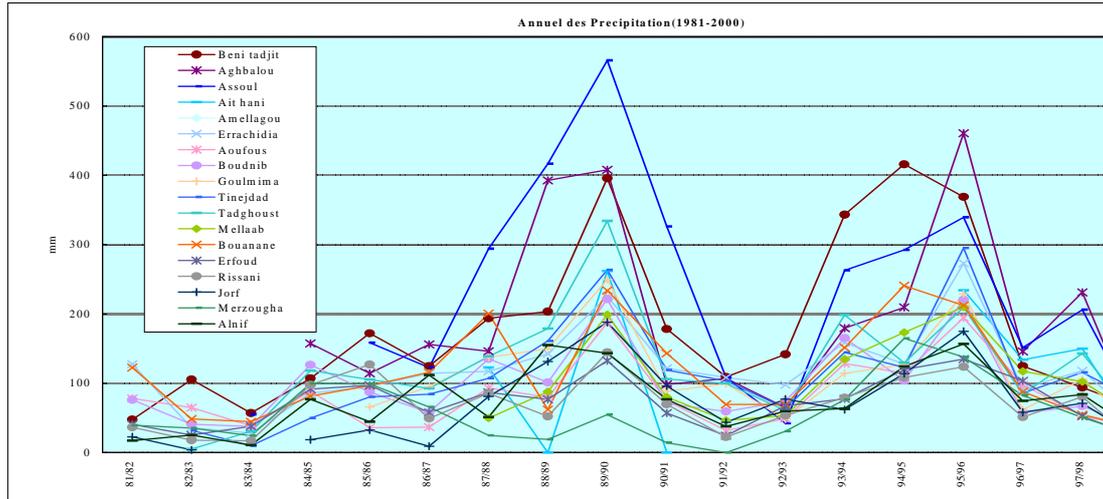
Le tableau suivant montre les débits de l'ensemble des khettaras tels qu'observés en 2001-2002 et 2005. On voit que la sécheresse qui s'est installée depuis 1997 a contribué à réduire les débits d'année en année.

Débit total des Khettaras

Période d'observation	2001 - 2002	2005
Débit total	1,277 lit/sec	1,124 lit/sec
Pourcentage	100 %	88 %

En considération de quoi on appliquera le débit total de 1 277/lit/sec observé en 2001-2002 pour l'analyse économique des réhabilitations de khettaras, par rapport aux données de débit de chaque khettara observé en 2005, attendu que :

- 1) Au cours des 20 dernières années, la sécheresse a sévit de 1981 à 1983, en 1991 et 1992, et de 1997 à aujourd'hui (2005). Après une période de sécheresse, le niveau piézométrique des nappes était rétabli au niveau de l'année qui la précédait au bout de un ou deux ans. Les débits observés en 2001-2002 paraissent plus faibles car l'observation se situait au cours d'une période de sécheresse prolongée, à 5 ou 6 ans de son début (1997). Il est donc prudent d'appliquer le débit de 2001-2002 à l'analyse économique des travaux de réhabilitation des khettaras, car le débit normal sera toujours plus important que celui de 2001-2002, et donc ces données offrent une marge de sécurité suffisante.
- 2) En principe les programmes de réhabilitation doivent être révisés régulièrement en fonction du monitoring et des évaluations faites au cours des dix années de travaux, afin de les adapter aux exigences économiques et rester conforme aux justificatifs du projet. L'analyse sensitive ci-dessous montre que le TRIE est légèrement inférieur lorsque les coûts grimpent ou que les bénéfices chutent. En fait il ne sera pas utile de réviser tout de suite le programme de travail original si les fluctuations de débit des khettara restent insignifiants.



Analyse sensitive

	TRIEE
Cas proposé	12,2%
- 10 % réduction de la production agricole	10,9%
- 10 % escalade des coût de projet	11,0%
- Les deux cas réunis	9,7%

B.4 Inventaire des réhabilitations

B.4.1 Réalisation des travaux de réhabilitation par l'ORMVA/TF

L'ORMVA/TF a commencé les travaux de réhabilitation des khetaras depuis le début des années 90 avec un support financier du budget local, IFAD, et de la BID, etc. Le tableau suivant résume les dépenses allouées aux travaux de réhabilitation des khetaras de 1995 à 2002.

Données financières relatives aux travaux de réhabilitation des khetaras réalisées par l'ORMVA/TF

(Unité : DH)

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	TOTAL
Budget total	51,300,000	35,288,000	90,650,000	106,140,000	174,610,000	128,196,000	139,135,000	143,590,000	868,909,000
Equipement									
Travaux de réhabilitation des khetaras (1)	3,622,560	597,910	3,830,500	870,270	5,924,520	2,090,360	3,356,890	1,816,360	22,109,370
Autres	47,677,440	34,690,090	86,819,500	105,269,730	168,685,480	126,105,640	135,778,110	141,773,640	846,799,630
Support financier sous PDRT (2)	3,032,560	297,910	3,380,500	555,270	924,520	90,360	956,890	416,360	9,654,370
FIDA	2,456,390	217,820	2,724,910	172,740	809,050	72,290	775,080	337,250	7,565,530
LF	576,170	80,090	655,590	382,530	115,470	18,070	181,810	79,110	2,088,840
BID	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIDA: Fond International pour le Développement Agricole

BID: Banque Islamique pour le Développement

LF: Loi de Finance

N.B: (1) = (2) + Budget propre de l'ORMVA/TF alloué aux khetaras

L'ORMVA/TF avait préparé un budget de 22 millions de DH pour les travaux de réhabilitation des khetaras. Les travaux de réhabilitation sous le PDRT financés par le FIDA et La BID sont désignés dans le tableau B.4.1. La nature des travaux de réhabilitation est indiquée dans le tableau ci dessous, et des informations détaillées sont listées dans le tableau B.4.2. Le nombre total des khetaras étaient de 200 durant neuf ans. Le coût de la réhabilitation d'une khetara est estimé approximativement à 110.000 DH, et la longueur réhabilitée est de 59.400 m qui est équivalente à 4.5 % de la longueur totale des khetaras qui est de 1,312.000 m.

Nature des travaux de réhabilitation

Travaux de réhabilitation	Reprofilage de la galerie (m)	Extension de la galerie (m)	Protection de la galerie (m)	Réhabilitation de la galerie (m)	Couverture de la galerie (m)	Bassin de régulation (sites)
Etendue des travaux	47,281	817	244	57,417	1,750	9

Source: ORMVA/TF

B.4.2 Programme d'aide à petite échelle

Les travaux de réhabilitation des khetaras ont été réalisés sous le programme d'aide à petite échelle du gouvernement japonais. Les sites réhabilités ainsi que les travaux sont désignés respectivement dans la figure B.4.1 et dans le tableau B.4.3.

12 khetaras et des réseaux d'irrigation ont été réhabilités avec un coût total de 6.1million DH.

B.5 Travaux de réhabilitation des khetaras

B.5.1 Contraintes des khetaras existantes

Considérant la projection d'une khetara indiquée dans le sous-chapitre B.1.1, les contraintes et les dommages de la khetara sont décrits ci dessous:

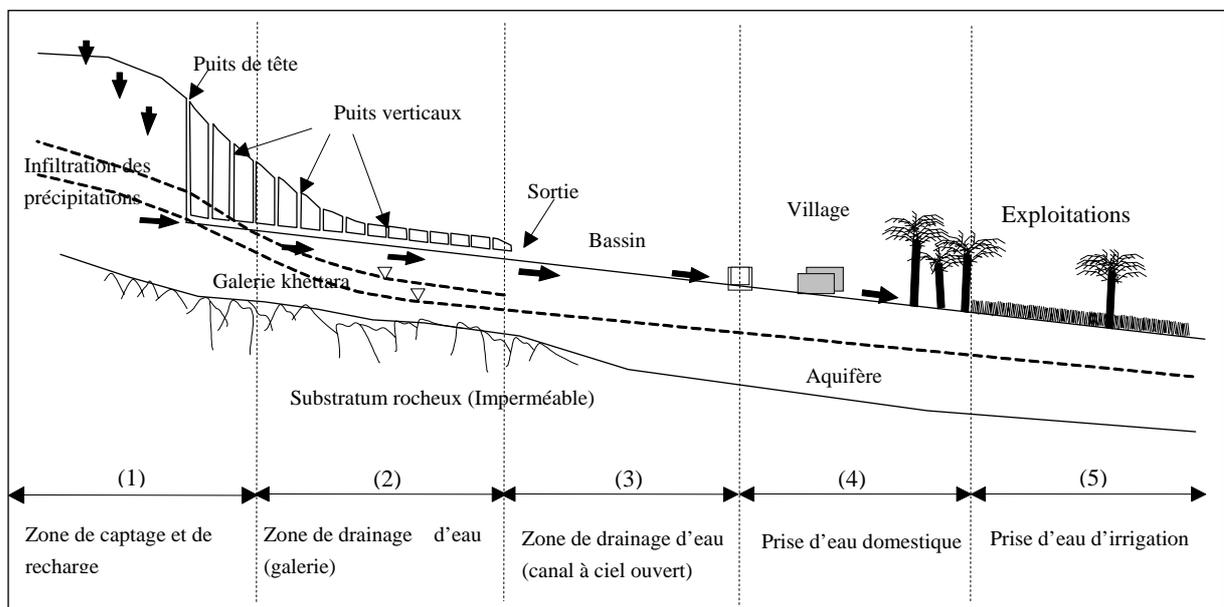


Diagramme schématique d'une khetara

1) Zone de captage et de recharge

Le dépôt des sédiments dans la galerie engendre un abaissement de la capacité de drainage d'eau de la galerie du canal. Les sédiments sont généralement composés de sable et de gravier, et ces matériaux sont des apports de sable provenant des puits verticaux et des effondrements des parois de la galerie. Cela s'observe principalement dans les khetaras situées dans les zones dunaires de sable, exemple zones de Jorf, Taouz et Tinejdad. Les effondrements des parois de la galerie sont causés par une répétition de sécheresse (rétrécissement) et l'humidité (gonflement) à l'intérieur de la galerie. Il est très effectif de garder les puits verticaux ouverts pour une ventilation continue d'air, d'autre part cette ventilation cause des infiltrations de sable à l'intérieur de ces puits. Actuellement, plusieurs puits verticaux de la plupart des khetaras sont fermés sur plusieurs

centaines de mètre à cause des apports de sable dus à l'infiltration et qui sont plus importants que ceux causés par les effondrements des parois de la galerie.

En outre, les crues causent des dommages aux galeries des khattaras qui sont adjacentes à la rivière (oued), spécialement dans les régions de Beni-Tadjid, Boudenib, Tinejdad et Alnif. La crue érode en premier lieu les puits verticaux et la galerie, et puis le sable et le gravier transportés par les écoulements se déposent successivement et colmatent la galerie de la khattara.

2) Zone de drainage d'eau (Galerie)

Tant que le niveau d'eau souterraine est inférieur à celui de la base de la galerie, des pertes d'eau sont observées dans cette section en complément des mêmes problèmes détaillés ci-dessus. La section des fuites est estimée à environ 60% de la longueur totale de la galerie en concordance avec les mesures de débit de plusieurs khattaras, il est donc nécessaire de réhabiliter cette section afin d'optimiser l'écoulement dans la khattara.

La section étroite de la galerie empêche les travaux de maintenance quotidienne comme le curage des dépôts de sable dans la galerie du canal. La largeur de la galerie est limitée à 0.3 jusqu'à 0.4 m, et sa haute de 0.8 à 1.2 m dans plusieurs khattaras objets d'investigation pendant l'étude. L'élargissement de la section de la galerie est un travail laborieux et spécialement pour le dégagement du sol extrait à travers les puits verticaux en plus des difficultés d'assurer un écoulement continu d'eau pour l'irrigation à l'aval de la khattara pendant les travaux. D'autant que la galerie devienne profonde pour accroître ses captages d'eau, de plus que les travaux de terrassement nécessitent des dépenses et de la main d'oeuvre, et les fondations rocheuses engendrent un immense travail pour le Reprofilage de la galerie.

3) Zone de drainage d'eau (Canal à ciel ouvert)

La plupart des tronçons en aval des khattaras sont des canaux à ciel ouvert à cause de la profondeur peu importante, par exemple moins de 3 m. La majorité des khattaras ont été réhabilitées par des plaques rocheuses ou par des dalettes en béton, toutefois quelques khattaras ne se sont pas réadaptées, en conséquence la quantité énorme de sable et du gravier tout au long du canal pénètre à l'intérieur du canal à ciel ouvert..

4) Zone de prise d'eau domestique

L'eau de la khattara est dispose afin d'assurer un ordre de desserte par priorité, en premier l'eau potable puis l'eau pour les travaux domestiques comme lessive et puis en final l'irrigation tout à la sortie de la khattara en tenant compte des considérations sanitaires. Comme les prises d'eau ne sont pas distantes les unes des autres, des risques de contamination par lavage ou de contagion par les animaux ne sont pas à éviter.

En plus, les fosses sceptiques individuelles représentent aussi un risque de contamination par ses eaux usées.

5) Zone de prise d'eau pour l'irrigation

Des grandes pertes d'eau sont observées tout au long des canaux d'irrigation à l'exception de ceux en béton.

B.5.2 Réhabilitation des khattaras

(1) Considération générale

En considérant les contraintes citées au paravent, plusieurs méthodes de réhabilitation sont proposées selon les spécificités de chaque objectif comme suit :

Méthodes proposées selon les spécificités de l'objectif

No.	Objectif de la réhabilitation	Travaux de réhabilitation
1	Augmentation du débit de la khattara	1-1 Extension de la galerie 1-2 Protection des parois de la galerie
2	Atténuation des pertes dans le canal de la galerie	2-1 Revêtement du canal de la galerie
3	Allègement des travaux de maintenance (dispense de main d'oeuvre et réduction des coûts)	3-1 Protection de la galerie 3-2 Protection des puits verticaux
4	Prévention contre les infiltrations de sable à l'intérieur de la galerie	4-1 Elévation des puits verticaux (regards) 4-2 Couverture des puits verticaux
5	Atténuation des pertes d'eau dans le canal à ciel ouvert	5-1 Revêtement du canal par du béton ou mortier
6	Prévention contre les infiltrations de sable dans le canal à ciel ouvert et dans le canal d'irrigation	6-1 Couverture du canal par dalette
7	Prévention contre les crues (galerie)	7-1 Elévation des puits verticaux (regards) 7-2 Protection de la galerie et des puits verticaux 7-3 Construction d'une digue de protection
8	Contrôle sanitaire	8-1 Revêtement du canal de la khattara par du béton ou du mortier ou de la maçonnerie 8-2 Construction des lavoirs 8-3 Couverture isolante pour protéger la galerie des infiltrations des eaux usées

Dans le planning des travaux de réhabilitation des khattaras, plusieurs méthodes de réhabilitation sont proposées, mais il faudra tenir compte aussi des restrictions sociales et traditionnelles et d'autres facteurs relatifs aux points techniques et économiques, comme :

- 1) Points techniques: Il est difficile d'anticiper une augmentation de débit par l'extension de la khattara tant que les études hydrogéologiques sont insuffisantes. A ce point de vue, il est essentiel de réaliser des études hydrogéologiques comme le forage, les tests de la résistivité électrique, etc.
- 2) Points économiques: Il est nécessaire de réaliser les travaux de réhabilitation des khattaras avec le budget alloué. En cas de proposition des travaux de réhabilitation, il y a plusieurs alternatives de procéder aux travaux, par exemple de répartir le budget à part égale à toutes les khattaras tout en limitant les distances des

tronçons à réhabiliter de chaque khettara, en commençant par les travaux qui sont économiquement vitaux pour la khettara, etc. Il est nécessaire aussi de fournir la meilleure solution correspondante au budget et au programme alloués.

- 3) Points sociaux: En général, les conditions géo hydrologiques des écoulements souterrains ne sont pas identifiées sans une exploration géo hydrologique détaillée. Pour cette raison, certains travaux de réhabilitation d'une khettara peuvent affecter le débit des khettaras adjacentes. De ce fait, il devient contraignant de mettre en application les travaux de réhabilitation. En outre, l'exploitation des eaux souterraines par des stations de pompage devient une contrainte pour les travaux de réhabilitation des khettaras parce que auparavant, ce changement avait créé une discorde entre les usagés des khettaras.

(2) Travaux de réhabilitation

Les photos expliquent les méthodes de réhabilitation proposées pour des objectifs spécifiés.

- (a) Protection des parois de la galerie
- (b) Revêtement du canal de la galerie
- (c) Construction d'une digue de protection contre les crues
- (d) Protection des puits verticaux
- (e) Protection de la galerie du niveau sanitaire
- (f) Utilisation du béton préfabriqué

(a) Protection des parois de galerie

Khettara Ait Ben Omar



Vue à la surface du sol



Galerie avant réhabilitation



Travaux d'excavation dans la galerie



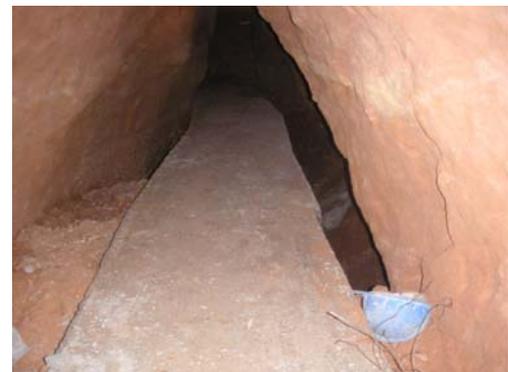
Galerie après élargissement



Pose des armatures et des dispositifs d'étanchéité



Mise en place du canal en béton



Haut de la couverture en béton du canal



Intérieur d'un canal en béton recouvert
largeur: 0,6m, H: 1,5m

Trou d'homme pour pénétrer dans la galerie tous les 30 m



(b) Revêtement du canal de la galerie

Khettara Diba



Khettara Diba

Avant réhabilitation. La roche de la galerie est saine. La largeur de 0,4m empêche de se déplacer librement lors de l'entretien.

Après élargissement de la galerie, pose d'un canal en béton de 0,6 m de largeur interne. Les travaux de maintenance sont ainsi facilités.



Espace entre la paroi latérale et la roche est rempli de béton



La galerie est excavée à partir du sol et recouverte de pierres plates. Sa profondeur est de 10 m environ au dessous du sol. La photo montre la galerie après le retrait des pierres de couverture afin d'assurer la sécurité à l'intérieur.



Remplacement de la couverture par une dalle en béton.

(a) Protection des parois de galerie

Khettara Lambarkia



Vue à la surface du sol avant réhabilitation



Excavation à la pelle mécanique et brise-roche géant



Excavation jusqu'au fond de la galerie
Après les excavations à ciel ouvert, nous avons recommandé la mise en place de béton.



Mise en place du béton (galerie et puits)
Galerie avec des puits à intervalle de 30m



Assemblage du coffrage des puits



Après remblayage



Puits de 5 m environ à partir du niveau de la fondation



Haut d'un puits (0,9 m x 0,9 m intérieur)

(a) Protection of gallery wall

Khettara Oustania



Vue à la surface du sol avant réhabilitation



Travaux d'excavation le long de la galerie



Mise en place du béton avec couloir



Mise en place du béton de la dalle de couverture



Galerie et puits à intervalles de 30 m
(Partie médiane des réhabilitations de 300m)



Galerie et puits à intervalles de 30 m
(Partie aval)



Intérieur d'un canal recouvert en béton

Khettara Oustania



Galerie et puits à intervalles de 30 m



Armatures du béton



Pose du béton précoulé



Intérieur d'un canal en béton recouvert
Largeur: 0,6m, H: 1,5m



Vue à la surface du sol après remblayage

(a) Protection des parois (avec conduite en PVC)

Khettara Oustania



Vue à la surface du sol
La galerie est à environ 18 m au-dessous de la surface



Intérieur de la galerie
Galerie d'environ 0,4 à 0,5 m de large



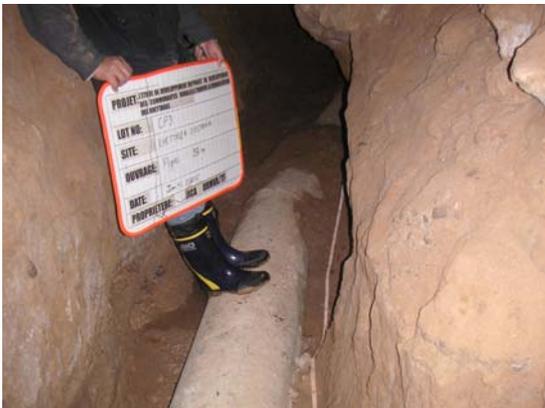
Conduite PVC (diamètre 400mm) pour atténuer les pertes au réseau dans les fondations de gravier.



Travaux d'excavation pour la mise en place des conduites PVC. La galerie est à 18 m au-dessous du sol.



Des ouvertures sont prévues pour retirer les sédiments dans les conduites.



Conduite PVC installée le long de la galerie

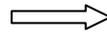


Partie amont de la conduite.
Le diamètre de la conduite est suffisamment large pour supporter les augmentations futures du débit.

Khettara Azag



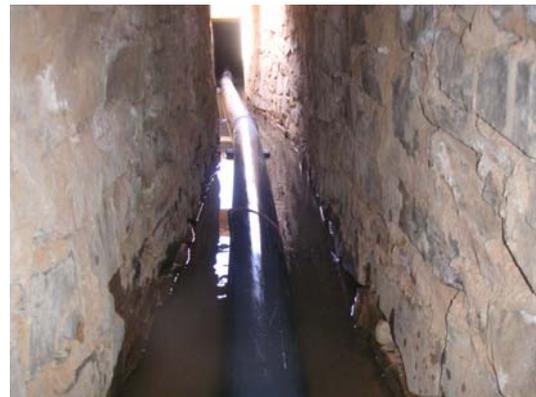
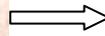
Avant réhabilitation. La paroi en maçonnerie de la galerie est endommagée par les crues.



Après réhabilitation des parois en maçonnerie (même emplacement que la photo de gauche)



Section de galerie avant réhabilitation. Avant les travaux, les dépôts fluviaux provoquaient des fuites.



Conduite PVC installée dans la galerie (diamètre 200mm)



27m de galerie entièrement abîmés par les crues.



Après réhabilitation avec des parois en maçonnerie, pose d'une conduite PVC pour empêcher les fuites.



Installation d'une buse d'aérag

(c) Construction d'un mur de protection contre les crues

Khettara Azag



Emplacement de la réhabilitation.



Protection contre les crues par un mur en maçonnerie (50m de long)



Erosion des berges. Le niveau d'eau se trouve à 1,2 m environ du lit de la rivière (le piquet horizontal indique le niveau d'eau)



Mur de protection terminé (maçonnerie)
Hauteur de 3,5 m des fondations ou 2,75 m du lit de la rivière.



Un puits supplémentaire a été ajouté près du mur de protection.



Intérieur du puits
Profondeur de 5,85m.

(d) Protection des puits

Khattara Agoumad



Vue à la surface du sol
Khattara est située le long de l'oued, et donc est endommagée par les crues.



Vue des travaux de réhabilitation



Les murs de protection contre les crues sont efficaces pour protéger la galerie des risques d'effondrement par l'érosion lorsque la khattara est près d'une rivière.



Puits endommagé par les crues



Excavation pour la protection en maçonnerie



Mise en place de la protection en maçonnerie dans le puits



Haut de la protection en maçonnerie
Les crues ne pénètrent plus dans la galerie.

(e) Protection des galeries pour le contrôle de l'hygiène

Khettara Bakassia



Après excavation le long de la galerie



Après remblayage de la galerie

La khettara traverse une zone habitée en aval, de sorte que l'eau est contaminée par les eaux usées et n'est plus potable.



La maçonnerie actuelle a été remplacée par du béton pour réduire les infiltrations d'eaux usées. Des dispositifs d'étanchéité sont prévus sur les joints du canal en béton pour la même raison.

(f) Application du béton précoulé



Béton précoulé pour les puits de la khattara Oustania



Coffrage en acier pour le béton précoulé (pour les puits)

Celui de gauche a été assemblé au Japon (0,6 m x 0,6 m x H 0,3 m) pour servir de référence, celui de droite a été assemblé au Maroc (1,2 m x 1,2 m x H 0,3 m)

B.6 Collecte de données pour le planning des ouvrages de recharge

B.6.1 Généralité

Une sévère sécheresse persiste dans la région de Tafilalet depuis 1997. L'ORMVA/TF a déjà réalisé plusieurs projets d'irrigation dans le but de sécuriser les ressources en eau pour l'agriculture, de même que l'ORMVA/TF continue de réaliser la nécessité de mise en œuvre des projets pour la préservation des ressources en eau souterraine y compris la recharge qui approvisionne constamment les khattaras et aussi les stations de pompage existantes durant les périodes de sécheresse. Pour les eaux souterraines utilisées par les khattaras et par les puits, des données fiables et suffisantes comme les données météorologiques et la piézométrie, sont nécessaires à la mise en œuvre et à la réalisation des projets de préservation des ressources en eau souterraine.

Dans ce chapitre, les investigations nécessaires en terme d'exploitation et le planning des ouvrages de recharge, sont expliquées.

B.6.2 Plan des ouvrages de recharge

Comme ça été expliqué dans le rapport principal, plusieurs méthodes sont proposées pour la recharge de la nappe.

Plan des ouvrages de recharge

Ouvrages de recharge	Méthodes de recharge
1) Construction de barrage de dérivation	⇒ i) Retenue dans une dépression naturelle ii) Construction d'une cuvette de recharge à petite échelle iii) Construction d'un large barrage type remblai ou barrage-poids iv) Dérivation sur des terres agricoles facilitant les infiltrations vers la nappe
2) Construction de barrage	⇒ i) Lâchés d'eau stockée pour accélérer la recharge à travers la rivière ii) Infiltration naturelle dans le réservoir
3) Construction de barrage dérivateur de crue (endiguement)	⇒ i) Accroître la surface de recharge par dispersion des eaux de crue afin d'accélérer la recharge de la nappe ii) Stockage temporaire des eaux de pluie pour un usage efficace de recharge de la nappe

En tenant compte des conditions topographiques et hydrogéologiques des lignes de partage des eaux de chaque khattara, des méthodes adéquates sont souhaitées pour la mise en œuvre des ouvrages de recharge. Les données météorologiques et hydrologiques sont essentielles pour le planning des ouvrages de recharge.

B.6.3 Collecte et classification des données

(1) Données météorologiques et hydrologiques

Toutes les stations météorologiques et hydrologiques ainsi que les données observées sont indiquées dans l'Annexe A. Parmi ces données, les précipitations, les écoulements et l'évapotranspiration sont les données les plus importantes pour le plan des ouvrages de recharge.

- Précipitations (Mensuelles)
- Température (Moyenne mensuelle, température maximale et minimale)
- Humidité (Moyenne mensuelle, humidité maximale et minimale)
- Vitesse du vent
- Evaporation (Moyenne journalière)
- Ecoulement (Mensuel)

Il est souhaitable de continuer de collecter les données journalières des précipitations et de l'écoulement afin d'établir un calcul précis du bilan d'eau.

(2) Piézomètre

En plus des données météo hydrologiques, les données piézométriques sont aussi importantes pour le planning des ouvrages ainsi que l'évaluation du projet. La DRH et l'ORMVA/TF suivent la piézométrie dans différents sites comme indiqué dans l'Annexe A.

Durant l'étude, l'observation des eaux souterraines avait juste commencé dans des puits au alentour de la zone de Jorf visant à collecter les données nécessaires pour le planning d'un ouvrage de recharge comme essai. Les localités des sites d'observation du niveau d'eau sont indiquées dans la figure B.6.1. Après l'analyse des données observées, il a été clarifié que :

- 1) Les données sur le niveau des eaux indiquent les eaux souterraines le long de la rivière Gheris sont considérablement influencées par les crues de cette rivière. Cet effet peut s'expliquer de la suite:
 - les niveaux des eaux souterraines observés à Bouya (Puits No. 1029/57) et à Hannabou (Puits No. 1048/57) qui se situent loin de la rivière Gheris, sont presque stables, alors que ceux observés dans la région de Jorf (Puits No. 1028/57, 3628/57, 3630/57) qui se situent au alentour de la rivière, sont tributaires des crues (fluctuation rapide avec le passage des crues).
 - les données des eaux souterraines observées dans la région de Jorf ont clairement indiqué que les fluctuations étaient proportionnelles aux précipitations durant les années de sécheresse de 1981 à 1988, 1993 à 1995, et les années pluviales de 1991 à 1993 et de 1996 à 1997, etc.
- 2) Le niveau des eaux souterraines a graduellement décliné depuis 1980. Abaissement annuel du niveau des eaux souterraines est estimé à 0.15 m selon les données observées à Bouya et à

Hannabou. (Voir figure B.6.2) (En général, il est dit que la situation devient une mise en garde quand le taux atteint 0.3 m par an)

Il est notifié que les observations du niveau des eaux souterraines prennent un rôle substantiel dans les investigations géo hydrologiques.

(3) Débit de la khattara

Le débit de la khattara est sensible aux changements saisonniers et annuels dus aux fluctuations de la pluviométrie, à la continuité de la sécheresse, à l'apparition des crues et aussi aux facteurs géo hydrologiques ou au potentiel de stockage des eaux en nappe aquifère. Puisque le débit est variable entre les khattaras adjacentes du à la complexité des structures géologiques, il est alors essentiel d'observer le débit de chaque khattara afin d'établir un plan d'ouvrage de recharge efficient et efficace.

Pour cette raison, Les 33 khattaras suivantes ont été sélectionnées pour une mesure journalière du débit.

Khattaras sélectionnées pour les mesures journalières de débit

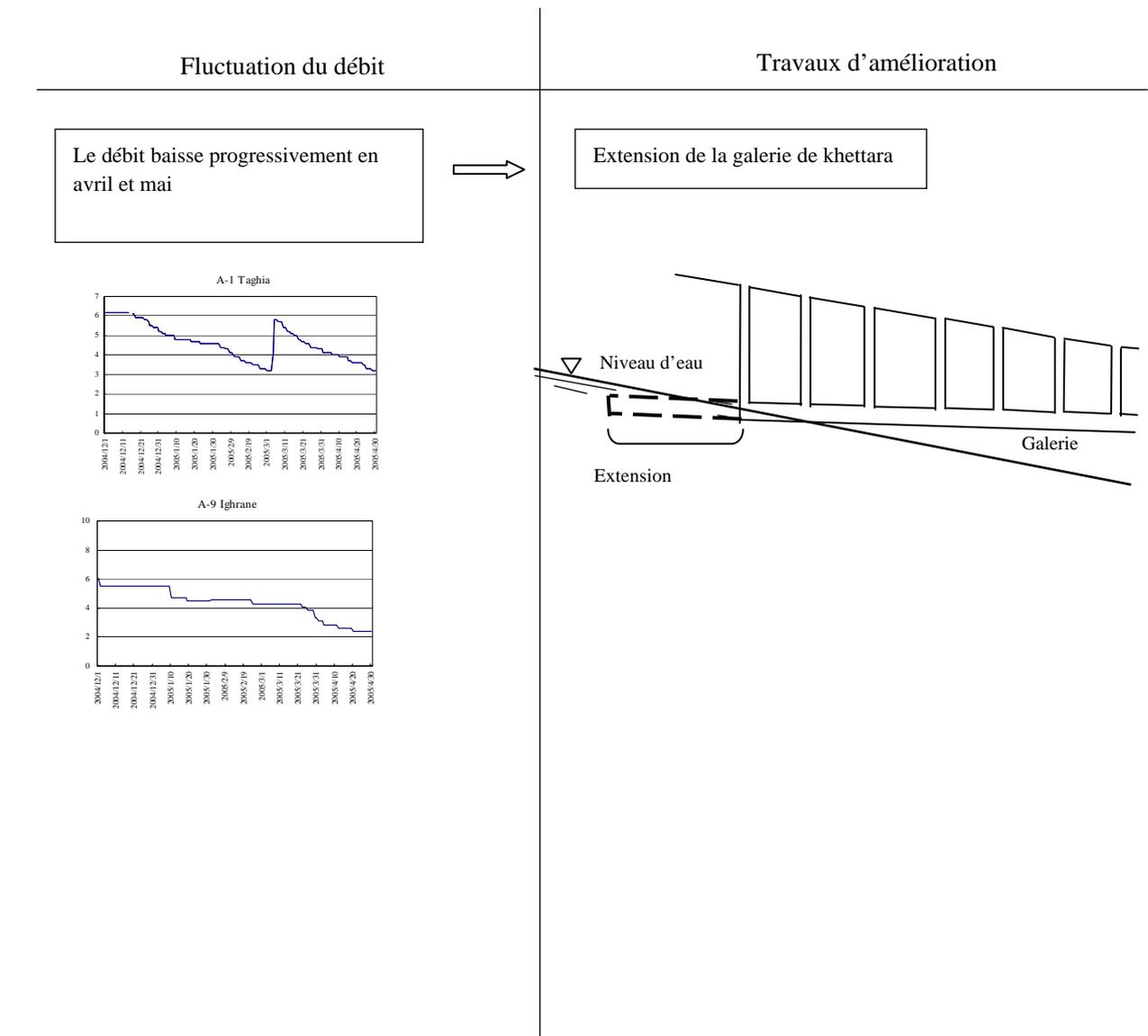
No.	Zone	Zone No.	ID No.	Khattara	Commune rurale	Source de recharge	Débit (l/s) 1décembre 2005
1	A	A 1	A-74	Taghia	Ferkla Ooulia	Toughache	6.2
2		A 2	A-65	Ait M'hamed	Ferkla Ooulia	Toughache	1.34
3		A 3	A-67	Tighfert	Ferkla Soufla	Tangarfa	9.06
4		A 4	A-59	Ait Ben Omar	Ferkla Soufla	Tangarfa	7.22
5		A 5	A-58	Diba	Ferkla Soufla	Tangarfa	1.3
6		A 6	A-49	Ait my Lmamoun	Ferkla Soufla	Gheris	4.5
7		A 7	A-41	Bakassia	Ferkla Soufla	Gheris	11.32
8		A 8	A-15	Aghroud	Mellaab	Gheris	9.35
9		A 9	A-8	Ighrane	Mellaab	N'chari	5.98
10		A 10	A-12	Oukhit	Mellaab	Oukhit	8.9
11	D	D 1	D-44	Lambarkia	Jorf	Batha	13.53
12		D 2	A-35	Aissaouia	Jorf	Batha	-
13		D 3	D-47	Lahloua	Jorf	Batha	11.88
14		D 4	D-55	Kdima Bouya	Jorf	Hnich	16.46
15		D 5	D-54	Jdida Bouya	Jorf	Hnich	17.31
16		D 6	D-60	Fougania	Jorf	Hnich	29.67
17		D 7	D-61	Ouastania	Jorf	Hnich	-
18		D 8	D-55	Krair Kdima	Jorf	Hnich	7.6
19		D 9	D-56	Krair Jdida	Jorf	Hnich	6.02
20	E	E 1	E-8	Lakdima Siffa	Siffa	Hnich	22.58
21		E 2	E-14	Haj Allal	Siffa	Hnich	21.79
22		E 3	E-16	Charchmia	Siffa	Hnich	-
23		E 4	E-7	Ramlia	Siffa	Hnich	10.91
24	G	G 1	G-60	Taomart Jdida	Alnif	Tomart	-
25		G 2	G-59	Taomart Lkdima	Alnif	Tomart	-
26		G 3	G-19	Tizi Lajiar	Alnif	Amssaad	-
27		G 4	G-18	Tizi Lakdima	Alnif	Amssaad	3.68
28		G 5	G-15	Alnif	Alnif	Amssaad	-
29		G 6	G-17	Ait Lahbib	Alnif	Amssaad	-
30		G 7	G-78	Tighourdine	Alnif	Talitat	6.78
31		G 8	G-64	Timarzite	Alnif	Timarzit	-
32		G 9	G-14	Agoumad	M'cisi	Ichichen	-
33		G 10	G-13	Taghrout	M'cisi	Ichichen	-

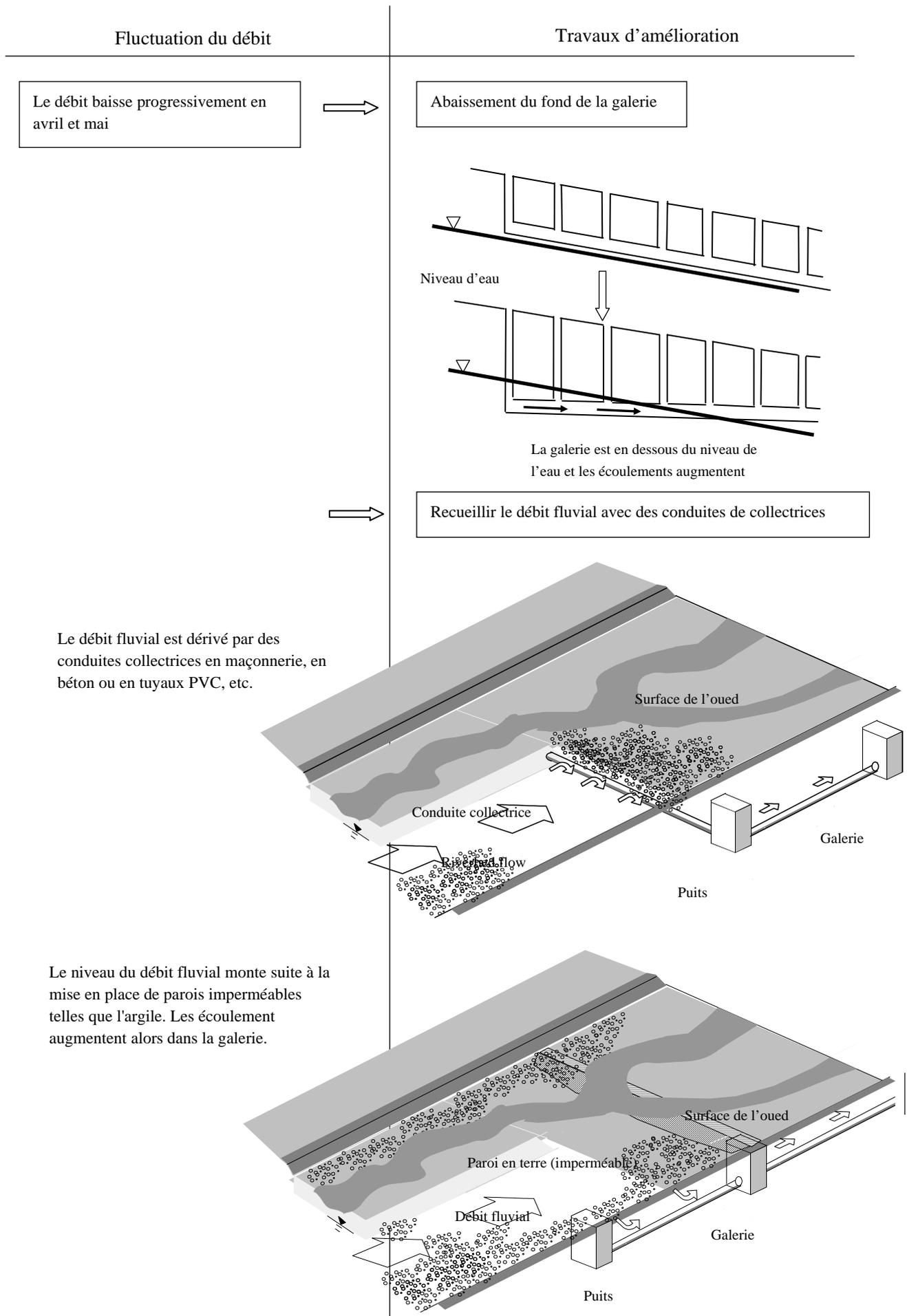
La localité et le débit observé sont mentionnés dans la figure B.6.3. La fluctuation du débit est schématiquement représentée sur la figure B.6.4 et indique que:

- 1) Zone A Le débit augmente du mois février au mois de mars, mais diminue petit à petit après cette saison. On suppose qu'une augmentation de la recharge augmente remarquablement à partir du mois de novembre jusqu'au mois de février, et que son effet apparaît quelques mois après. Etant donné que le bassin des khettaras n'est pas très grand et que les nappes sont de petite capacité, leur débit reste permanent et baisse petit à petit jusqu'à la saison des pluies suivante.

- 2) Zone D, E Le débit est constant tout au long de l'année. On suppose que dans ces zones la recharge s'observe six mois ou plus après le passage d'une crue du Gheris, en se basant sur l'expérience des habitants.
- 3) Zone G La plupart des khattaras situées le long du Reg sont à sec en mai et juin du fait que l'eau du lit de l'oued (eau en sous-sol) baisse à cause du manque de pluie. On ne cultive pas pendant cette période, sauf quelques cultures essentielles par pompage. Il est possible d'augmenter le débit des khattaras en creusant la galerie au-dessous du niveau du lit de l'oued. Il est à noter encore que le débit des khattaras situées le long des affluents augmente rapidement tout de suite après une crue et baisse doucement s'il ne se produit pas d'autre crue ensuite.

En fonction de ces considérations, nous proposons les solutions suivantes pour augmenter le débit des khattaras :





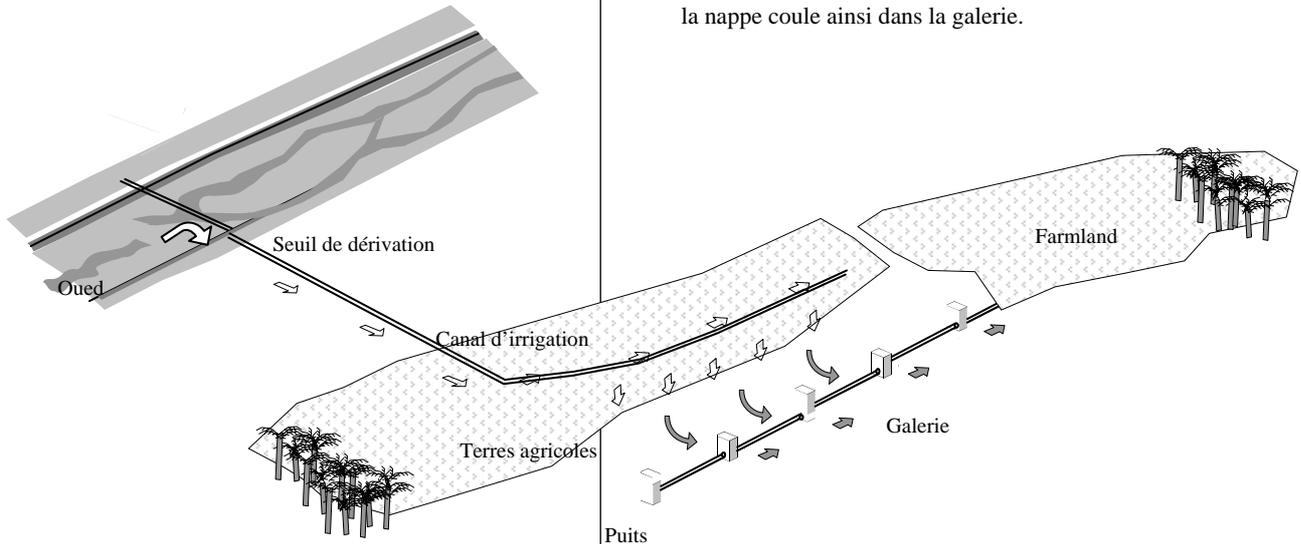
Fluctuation du débit

Travaux d'amélioration

Etant donné que la khattara est loin de l'oued, la recharge par le débit fluvial est minime

Dérivation des crues par des canaux d'irrigation

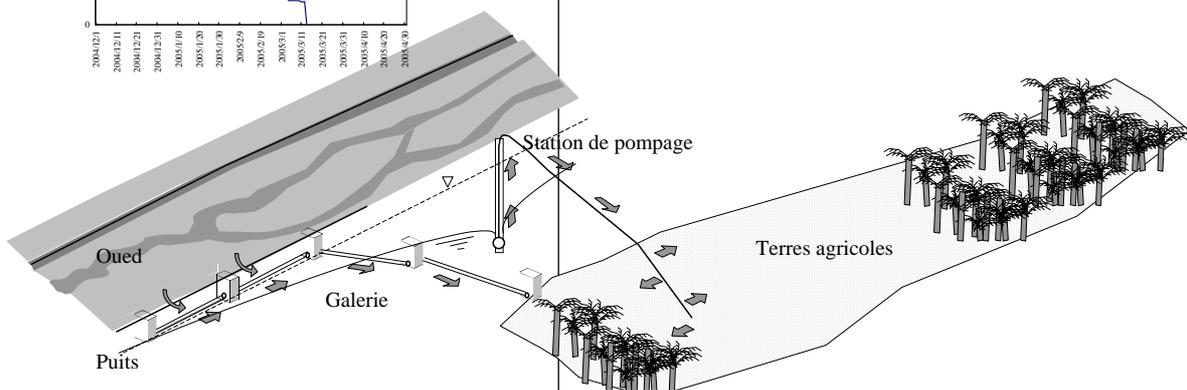
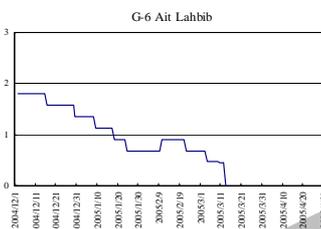
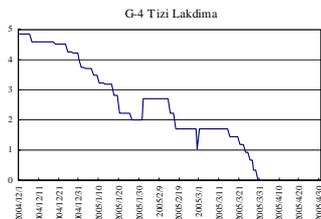
L'excédent des eaux dérivées par le seuil pour l'irrigation s'infiltrent dans le sol, contribuant à relever le niveau de la nappe près des terres agricoles. L'eau de la nappe coule ainsi dans la galerie.



Le débit fluvial est à son minimum en mai et juin et donc la khattara est à sec durant cette période.

Les pompages fournissent une source d'appoint pour l'irrigation

La khattara est à sec d'avril à mai à cause de la baisse du débit fluvial. En plus de l'abaissement du fond de la galerie, les pompages fournissent un supplément d'eau utile pour l'irrigation.



Fluctuation du débit

Etant donné que la khattara est loin de l'oued, la recharge par le débit fluvial est minimale.



Travaux d'amélioration

Construction d'un barrage de recharge ou de retenue

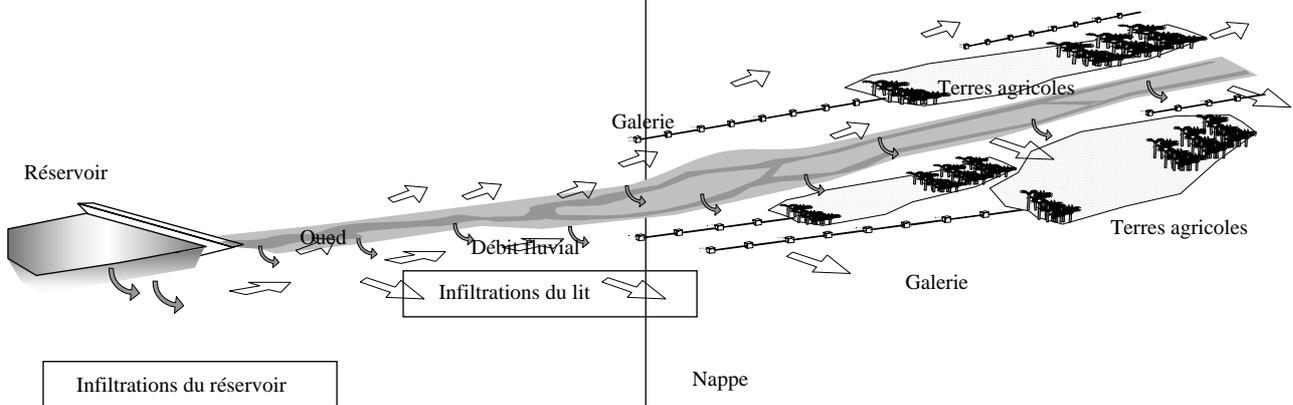
Le barrage contribue à la recharge des nappes par les infiltrations de sa fondation, ou les eaux lâchées du barrage s'infiltrent dans le lit des rivières et donc rechargent les nappes.

Les barrages sont construits pour deux raisons : 1) pour retenir les eaux de surface et l'envoyer directement vers les terres agricoles par l'intermédiaire de canaux. La recharge se fait indirectement par les eaux d'infiltration de la fondation du barrage ou du lit.

2) uniquement pour recharger les nappes. Ce type de barrage contribue à la recharge des nappes par les fondations du barrage ou par le lit.

Des quantités énormes de sable et de gravier se sont amoncées dans l'oued ; il faudra retirer les sédiments du barrage. Les mesures suivantes sont envisageables :

- 1) Dériver l'eau de l'oued vers le réservoir lorsque les écoulements de sédiments sont faibles. En cas de crue, les déplacements de sédiments sont réduits après une pointe
- 2) Assurer un amoncellement constant de sédiments.
- 3) Installer des poches de sédiments (petits lacs ou séries de ceintures) pour empêcher les sédiments de pénétrer dans le réservoir.



(4) Station de pompage

L'emplacement des stations de pompage d'eau potable est indiqué à la figure B.2.9. Elles sont suffisamment éloignées des khattaras pour ne pas affecter leur débit. Dans la région d'Alnif elles sont situées près des khattaras, mais la plupart en aval, et elles prennent l'eau d'aquifères différents situés à 30 m de profondeur.

La figure B.6.5 indique les données de conductivité électrique relevées à chaque station de pompage. Elle montre aussi l'emplacement des écoulements de khattaras égaux ou inférieurs à 5,0 lit/sec. Nous avons vu que nous proposons de pomper l'eau des nappes pour fournir les volumes supplémentaires d'eau d'irrigation sur les khattara dont le débit est minime ou accuse des fluctuations saisonnières. La conductivité électrique est élevée à Mellaab dans la zone A, à Rissani dans la zone F et au sud d'Alnif (zone G). Si la conductivité électrique est supérieure à 2000 dS/cm, l'eau n'est pas propre à l'irrigation, sauf si elle subit un traitement spécial contre la salinité conformément aux normes USDA (Département de l'Agriculture des Etats-Unis). Il en ressort que l'eau pompée dans les nappes profondes de ces zones est difficilement utilisable pour l'irrigation (voir tableau B.2.4). On pourra utiliser l'eau des nappes, des dépôts fluviaux et des puits manuels pour l'irrigation.

B.6.4 Investigations pour les barrages de recharge

(1) Généralité

Trois sites ont été proposés sur la région de l'étude, à Tanguerfa, Fezzou et Ahassia. Nous indiquons ci-après les caractéristiques géologiques de ces sites. La zone de captage, les volumes d'écoulement, la capacité du réservoir et le potentiel de recharge sont présentés dans le rapport principal.

(2) Caractéristiques géologiques

(a) Zone d'Alnif (site de Fezzou et Ahassia)

1) Géologie

- Alternance de formations de sable et de schistes sur l'ensemble des site de Fezzou et Ahassia. Le litage recoupe les formations. Des fissures apparaissent en surface à intervalles relativement importants de plusieurs mètres. Le champ de blocs au pied du plan incliné fait apparaître une similitude avec les roches métamorphiques du métamorphisme général.
- Roche volcanique (roche extrusive : basalte) répartie sur le site de Fezzou. De même que pour l'alternance des formations de sable et de schiste, on observe une interaction du métamorphisme général.
- Dépôts fluviaux s'observent dans le lit des oueds à Fezzou et Ahassia. Ces dépôts fluviaux se composent principalement de sable et de gravier. L'épaisseur, variable selon les endroits, pourrait atteindre 20 à 30 m d'après les caractéristiques topographiques des deux appuis. Des

pierres rondes de 30 cm maximum se sont déposées dans le lit. Les dépôts de gravier sont durs et principalement constitués de roche volcanique, de grès et de schistes. Le sable n'est pas consolidé.

- Cônes d'éboulis observés à Fezzou et Ahassia. Ils sont constitués de gravier angulaire qui proviennent de l'effondrement de l'arête rocheuse. Ils sont stables et le gradient de pente est en angle de repos (talus d'équilibre).
- Force portante : La fondation rocheuse est suffisante pour supporter le poids du corps de barrage. Les risques de glissement existent à la surface des fissures provoquées par des surfaces de dépôts, mais des investigations supplémentaires devront être faites, en particulier pour étudier l'étendue des fissures dans le cas d'un barrage-poids, et la résistance au cisaillement de long des fissures.

2) Type de barrage et envergure

La fondation et les appuis des deux sites de barrages sont constitués de roche saine. Nous proposons donc un barrage-poids car le volume des excavations du déversoir est inférieur à ceux d'un barrage en remblai. La hauteur de barrage pourrait être de 20 à 30 m maximum aussi bien à Fezzou qu'à Ahassia, compte tenu des conditions topographiques des deux sites.

3) Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique doit se situer dans les dépôts fluviaux dans les deux cas.

4) Perméabilité des fondations

Nous proposons d'étudier la perméabilité le long des fissures. La plupart des fissures se sont développées dans le sens horizontal à partir des surfaces de dépôts ou des fissures perpendiculaires. Si les fissures sont continues jusqu'en aval du barrage elles risquent de former une ligne de percolation. Si l'un des appuis est mince, il faudra vérifier les risques d'infiltrations induits par des passages réduits d'infiltration.

5) Injection de coulis

Une injection de coulis ordinaire est efficace pour améliorer la perméabilité des roches fissurées. Dans le cas des appuis minces, il faut inévitablement faire une injection de coulis.

(b) Site Tanguerfa

1) Géologie

- Alternance de grès et de schistes sur tout le site. Le grès domine largement (rapport grès/schiste de 9 : 1). Le plan de litage se retrouve dans les formations alternées. Des fissures courent en surface à de faibles intervalles de 10 cm. L'orientation est ENE - WSW avec un angle d'inclinaison de 10°. L'appui droit du barrage forme une pente structurale, l'appui gauche une pente structurale négative. Les deux appuis ont donc une configuration asymétrique, le côté droit

étant en pente douce, le côté gauche en pente relativement abrupte. L'observation du champ de blocs au pied de la face inclinée montre une similitude avec les roches métamorphiques du métamorphisme général.

- Dépôts fluviaux dans le lit. Ils sont principalement constitués de sable et de gravier. Leur épaisseur ne devrait pas dépasser 20 m. La couche est fine sur l'appui droit. Les pierres rondes de 50 cm de diamètre se sont déposées dans le lit. Les dépôts de gravier sont principalement composés de calcaire, de grès et de schistes. Le sable est non consolidé.
- Force portante : La roche est saine sur les deux appuis, et l'on n'observe aucune couche altérée. La fondation peut facilement supporter le corps de barrage. Il y a des risques de glissement à la surface des fissures provoquées par les surfaces de dépôts inclinées de l'amont droit à l'aval droit. Il est quelque peu difficile d'affirmer que dans le cas d'un barrage-poids la sécurité est garantie. Il faudra faire des investigations plus poussées en particulier des fondations d'un barrage-poids du point de vue de la présence des fissures, de leur étendue et de la résistance au cisaillement le long de ces fissures. Les fissures ne réduisent pas la stabilité dans le cas d'un barrage en remblai.

2) Type de barrage et envergure

Les deux appuis du barrage sont constitués d'affleurements de roche saine. La longueur de crête étant plus longue, le barrage remblai ne sera pas privilégié car il demande des travaux d'excavation importants des deux appuis pour construire le déversoir. Nous proposons donc un barrage-poids. La hauteur maximum de barrage pourrait être d'environ 10 m compte tenu des conditions topographiques en amont du réservoir.

3) Niveau piézométrique

Le niveau piézométrique se situe à 14 m de la surface du sol selon les observations pratiquées dans les puits de la région devant abriter le réservoir, à quelques centaines de mètres de l'axe de barrage. Le niveau piézométrique de la nappe devrait se situer entre 10 et 20 sur le site du barrage.

4) Perméabilité des fondations

Nous suggérons d'analyser la perméabilité le long des fissures. La plupart se sont développées à l'horizontale à cause des surfaces de dépôts et des fissures perpendiculaires. Si les fissures sont continues d'amont en aval du barrage elles risquent de former une ligne de percolation.

5) Injection de coulis

Les injections de coulis ordinaires sont efficaces pour améliorer la perméabilité de roches fissurées. Dans le cas des appuis mince, il faut inévitablement faire une injection de coulis.

Les caractéristiques topographiques et hydro géologiques de chaque barrage sont résumées au tableau B.6.1.

B.6.5 Investigation pour une cuvette de recharge

Nous avons étudié l'emplacement et la présence d'eau des puits de tête pour la petite cuvette de recharge proposée entre Jorf et Hannabou. Toutes ces informations sont indiquées au tableau B.6.2 et à la figure B.6.6.

D'après le plan proposé, la cuvette se situe en amont de l'oued Hinich. Les investigations sur le terrain, en particulier sur l'emplacement du puits de tête, sont particulièrement utiles pour approfondir l'analyse de cet ouvrage de recharge.

	<p style="text-align: center;">Site du barrage Ahassia (Alnif)</p> <p>Rive gauche Rive droite</p>  <p style="text-align: center;">Axe de barrage proposé vers l'aval</p>
	<p>Rive droite Rive gauche</p>  <p style="text-align: center;">Réservoir vers l'amont Un barrage secondaire est prévu pour augmenter la capacité de stockage le long de la rive droite.</p>
<p>A l'extrême amont de la crête de rive droite à environ 1 km en amont de l'axe de barrage Il faut prévoir un barrage secondaire dans le cas des barrages de plus de 30 ou 40 m de large.</p> <p>Dépôts fluviaux sur le lit de la rivière (Sable et gravier)</p>	 

Site du barrage de Fezzou (Tout à fait en amont)



Axe de barrage proposé (à gauche de la photo) et réservoir vu du côté gauche

De grands affluents se rejoignent en amont du barrage sur la rive droite. Quelques familles vivent sur la zone du réservoir (au centre de la photo)



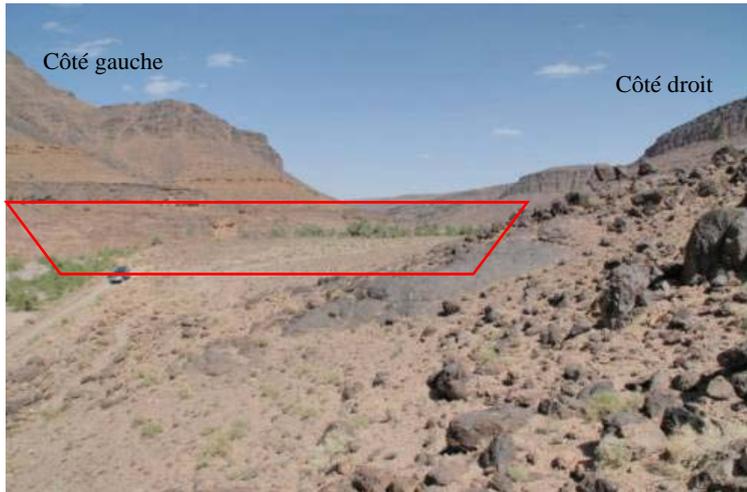
Réservoirs vers l'amont

Site de barrage proposé vu du côté gauche aval du barrage



Site du barrage de Fezzou (Site cours moyen) (Alnif)

Axe de barrage proposé
vu de l'amont de la rive
droite



Réservoir vu de l'aval
De large cônes d'éboulis
s'accumulent dans le réservoir.

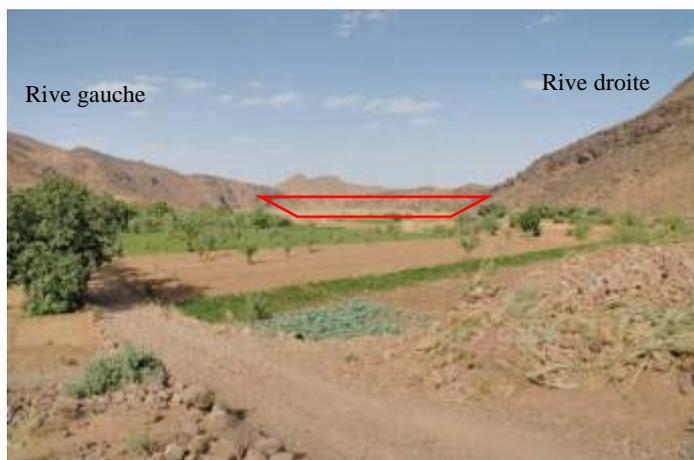


Affleurements de roche
sableuse (côté droit de
l'appui du barrage)



Site du barrage de Fezzou (tout à fait à l'aval) (Alnif)

Photo du réservoir vu vers l'aval



Axe du barrage vu vers l'aval

La crête de l'appui droit est fine et assez basse (environ 20 m)



Photo de l'appui droit du barrage

L'appui n'a que 10 m de large et des fissures prononcées risquent de former des filons de fuites de l'amont à l'aval du réservoir.



<p>Site du barrage de Fezzou (A l'extrême aval) (Alnif)</p>	
<p>Rive gauche</p>	<p>Rive droite</p>
	
<p>Axe de barrage proposé (vu vers l'aval) L'appui droit forme une crête fine, et son altitude est faible.</p>	
<p>Lit de la zone réservoir Accumulation de dépôts fluviaux principalement composés de sable et de graviers.</p>	<p>Côté droit</p> <p>Côté gauche</p> 
 <p>Appui droit</p> <p>Une roche d'intrusion apparaît sur l'appui droit qui traverse des formations de roches sableuses et des formations schisteuses alternées.</p>	<p>Agrandissement de la photo de gauche pour mieux voir la roche intrusive</p> 

Site du barrage Tanguerfa (Ferkla Soufla)



Axe de barrage proposé (à gauche de la photo) et réservoir vus du côté droit du réservoir

Plusieurs oueds coulent en amont du réservoir

Affleurements sur l'appui gauche du barrage

L'appui gauche est formé de formations de roche sableuse et de roche schisteuse alternées. Un angle faible du soubassement et des failles risquent de constituer des filons de fuites si les failles sont reliées entre elles d'amont en aval du corps de barrage.



Dépôts fluviaux du réservoir.

Le lit de la rivière est composé principalement de sable et de graviers sur une profondeur de 20 m environ semble-t-il d'après le niveau de la nappe observé dans le puits près du barrage.

