*Télédétection*, 2005, vol. 5, n°(1-2-3), p. 3–18

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

# NECESSITE DE DEVELOPPEMENT D'UNE METHODOLOGIE D'INVENTAIRE BASEE SUR DES PHOTOGRAPHIES AERIENNES NUMERISEES, LA REALITE DE TERRAIN ET UN SIG : LE CAS DES AMENAGEMENTS DE CONSERVATION DES EAUX ET DU SOL EN TUNISIE

NOAMENE BACCARI[a], MOHAMED RACHED BOUSSEMA[a] et MOHAMED HABIB SNANE[b]
[a] *Laboratoire de télédétection et systèmes d'informations à référence spatiale,*
*École nationale d'ingénieurs de Tunis, Boîte Postale 37,*
*1002 Tunis-Belvédère,Tunisie.*
*Téléphone* : 216-7187-4700 *; télécopieur : 216-7187-2729.*
*Courriel :* noamene_b@yahoo.fr

[b] *Institut national agronomique de Tunisie,*
*43, avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis, Tunisie.*
*Téléphone* : 216-127-7110

*(soumis : 19 janvier 2004 ; révisé : 23 mars 2004 ; accepté 4 août 2004)*

La situation géographique de la Tunisie lui confère un climat diversifié, dominé par l'aridité au centre et au sud du pays. Les sols sont aussi très menacés par la dégradation. Pour surmonter ces handicaps naturels, la Tunisie a résolument opté pour une stratégie de gestion et de conservation des eaux et du sol favorisant le développement d'aménagements anti-érosifs adaptés à ces conditions particulières. Cependant, très peu d'études ont été menées sur l'efficacité de ces aménagements, à l'échelle du bassin versant, faute d'un outil méthodologique permettant d'analyser leur efficacité ainsi que d'informations fiables sur leur évolution. En Tunisie, les programmes d'inventaire et de cartographie des aménagements de bassin versant connaissent donc un retard considérable. Cette situation constitue pour plusieurs régions un frein aux projets de développement rural.

L'émergence de la géomatique, permet cependant d'aborder cette problématique avec de nouveaux outils d'analyse cartographique. Ainsi, dans cet article, nous développons une méthodologie d'inventaire et de cartographie des aménagements se fondant sur l'utilisation des photographies aériennes et des outils informatiques spécialisés dans le traitement d'image et la cartographie. Nous nous proposons en particulier d'inventorier les aménagements de conservation des eaux et du sol des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar et de les cartographier en lien avec la lithologie de leur substratum rocheux ou des formations meubles. Ces deux bassins appartiennent au grand bassin versant de l'oued Merguellil dans la région du Kairouan.

À cet effet, une quinzaine de photographies aériennes de 1989 ont été numérisées. Elles ont été ensuite géoréférencées, puis orthorectifiées dans le logiciel de traitement d'image ERDAS Imagine grâce aux coordonnées des repères de collimation, à la distance focale de l'objectif de l'appareil photographique, au choix de six points d'amer et à l'utilisation d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Les orthoimages ainsi obtenues ont été assemblées sur écran en une seule image appelée orthomosaïque. Cette orthomosaïque, intégrée dans un SIG, a servi de source principale pour la numérisation à l'écran et l'élaboration des cartes des réseaux hydrographiques et des aménagements. Des relevés de terrain ont été nécessaires pour établir la nature des unités lithologiques et pour caractériser les ouvrages de conservation des eaux et des sols sur les versant et les cours d'eau. Le SIG a permis la création d'une base de données contenant les caractéristiques physiques des bassins versants et les cartes thématiques, notamment celle des aménagements et celle des unités lithologiques. La superposition de ces deux cartes met en évidence l'inadaptation ou l'adaptation d'aménagements aux réalités lithologiques.

*Mots-clefs : aménagement ; SIG ; bassin versant ; photographies aériennes numérisées.*

# NECESSITY FOR THE DEVELOPMENT OF AN INVENTORY METHODOLOGY BASED ON DIGITAL AERIAL PHOTOS, FIELD INVESTIGATION, AND SIG : THE CASE OF WATER AND SOIL CONSERVATION MANAGEMENT IN TUNISIA

Most of Tunisia is characterized by an arid climate and degraded land. Therefore, many soil and water conservation projects were implemented all over the country for more than fifty years. However, few surveys were carried out to study the efficiency of these projects in reducing erosion and improving water availability to corps. Recent development of geomatic techniques, GIS and computer image treatment has made possible to find out a more cost effecter methodology to carry out an inventory and

serving of the conservation structures implemented in these watershed management projects. This research is a contribution to the development of an inventory methodology based on aerial photographs analysis techniques, field investigation and GIS. The case study is two neighbouring watersheds located in Merguellil catchments areas : there are Ettiour and El Hjar wadis.

Fifteen aerial photographs of 1989 mission were digitized and ortho-rectified with ERDAS Imagine software wring of every photo the coordinates of the fiducial marks and six control points together with the Digital Model of Altitude (DMA) developed from the 1/50 000 scale topographic maps. The inclusion of the aerial photographs orthomosaïc in GIS has allowed the mapping of Soil and Water Conservation works and the drainage network. The intersections of these themes with the lithologic formations map using the GIS enable us to extract a new theme including both the lithologic formations and the Soil and Water Conservation structure existing in the two watersheds. We have found that some soil conservation structures are badly adapted to the underlying lithologic formations such as terraces built on marl formation. Future Soil and Water Conservation projects will be planed considering the location of existing CES structures together with the lithologic formations underlying the project areas.

*Keywords : aerial photographs ; GIS ; soil and water conservation ; lithology.*

## 1. INTRODUCTION

Pour résoudre le problème de la dégradation des sols, notamment de l'érosion, et pour mieux gérer ses ressources naturelles, la Tunisie a résolument opté pour une stratégie de gestion et de conservation des eaux et du sol (CES). Elle a plus particulièrement favorisé le développement des aménagements anti-érosifs adaptés aux diverses conditions édaphiques présentes, par exemple les banquettes de terre sur les sols profonds et non marneux, les cordons en pierres sèches sur les lithosols et le piémont, les murettes sur les terrains montagneux (El Amami, 1984) ainsi que les zones de reboisement et les bandes enherbées dans les terres marneuses (Snane *et al.*, 1988). Cependant, très peu d'études ont été menées sur l'efficacité de ces aménagements à l'échelle du bassin versant. Ceci est dû à une carence d'outils méthodologiques performants, peu coûteux et rapides, susceptibles de fournir des informations fiables sur le territoire. Cette situation constitue pour plusieurs régions un frein dans le choix et la planification des projets de développement rural.

À cet effet, nous avons donc développé une métho-dologie d'inventaire et de cartographie des aména-gements de CES. La méthodologie adoptée est fondée sur l'utilisation des photographies aériennes et d'un système d'information géographique (SIG) et elle a été appliquée aux bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar, en Tunisie centrale.

L'objectif principal de la présente recherche est double. Il s'agit, d'une part, de développer une méthodologie d'inventaire et de montrer comment nous pouvons, à partir des photographies aériennes et dans un temps relativement court, extraire une quantité importante d'informations concernant les aménagements des bassins versants et, d'autre part, d'évaluer leur efficacité en relation avec leurs sub-strats lithologiques.

## 2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude couvre deux bassins versants voisins, ceux des oueds Ettiour et El Hjar, qui font partie du grand bassin versant de l'oued Merguellil. Elle est située au sud de la dorsale tunisienne, à 60 km au nord-ouest de Kairouan (figure 1). Sa superficie totale est de 53 km$^2$ et l'altitude varie de 320 m, au niveau de l'exutoire naturel, à 895 m à l'extrême nord (djebel Oueslata). Les formations géologiques affleurantes dans la région sont essen-tiellement formées de calcaire, de marne et d'argile avec quelques intercalations d'origine détritique.

Les données météorologiques de la zone d'étude montrent une irrégularité annuelle et saisonnière de la pluviométrie et une fluctuation assez importante de la température :

– une pluviométrie moyenne annuelle de 350 mm/an, une pluie annuelle de 200 mm en fréquence décennale sèche et 550 mm en fréquence décennale humide ;

– une température moyenne mensuelle inférieure à 10 °C au mois de janvier et supérieure à 30 °C au mois d'août.

Ainsi, les caractéristiques climatologiques de la région reflètent bien que celle-ci est sous l'influence de l'étage bioclimatique semi-aride inférieur à hivers tempérés. De même, le climat constitue un facteur limitant pour la production agricole et pour la stabilité du sol.

## 3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Le matériel utilisé pour extraire les données de base est composé (tableau 1) :

– des photographies aériennes non rectifiées d'une mission de 1989 à l'échelle du 1/20 000 ;

– du logiciel ERDAS Imagine pour la rectification des photographies et du système d'information géographique (SIG) Arcview GIS ;

– de cartes topographiques au 1/50 000, présentant une erreur de 3 m dans la topographie et couvrant les deux bassins versants qui sont compris entre les coordonnées Lambert ($X_1$ = 472 000 m, $Y_1$ = 278 000) et ($X_2$ = 483 000, $Y_2$ = 268 000) ;

– la carte géologique au 1/50 000 de Haffouz cou-vrant une partie de la zone d'étude.

Les cartes thématiques ont été élaborées à partir de ce matériel et vérifiées par des relevés sur le terrain.

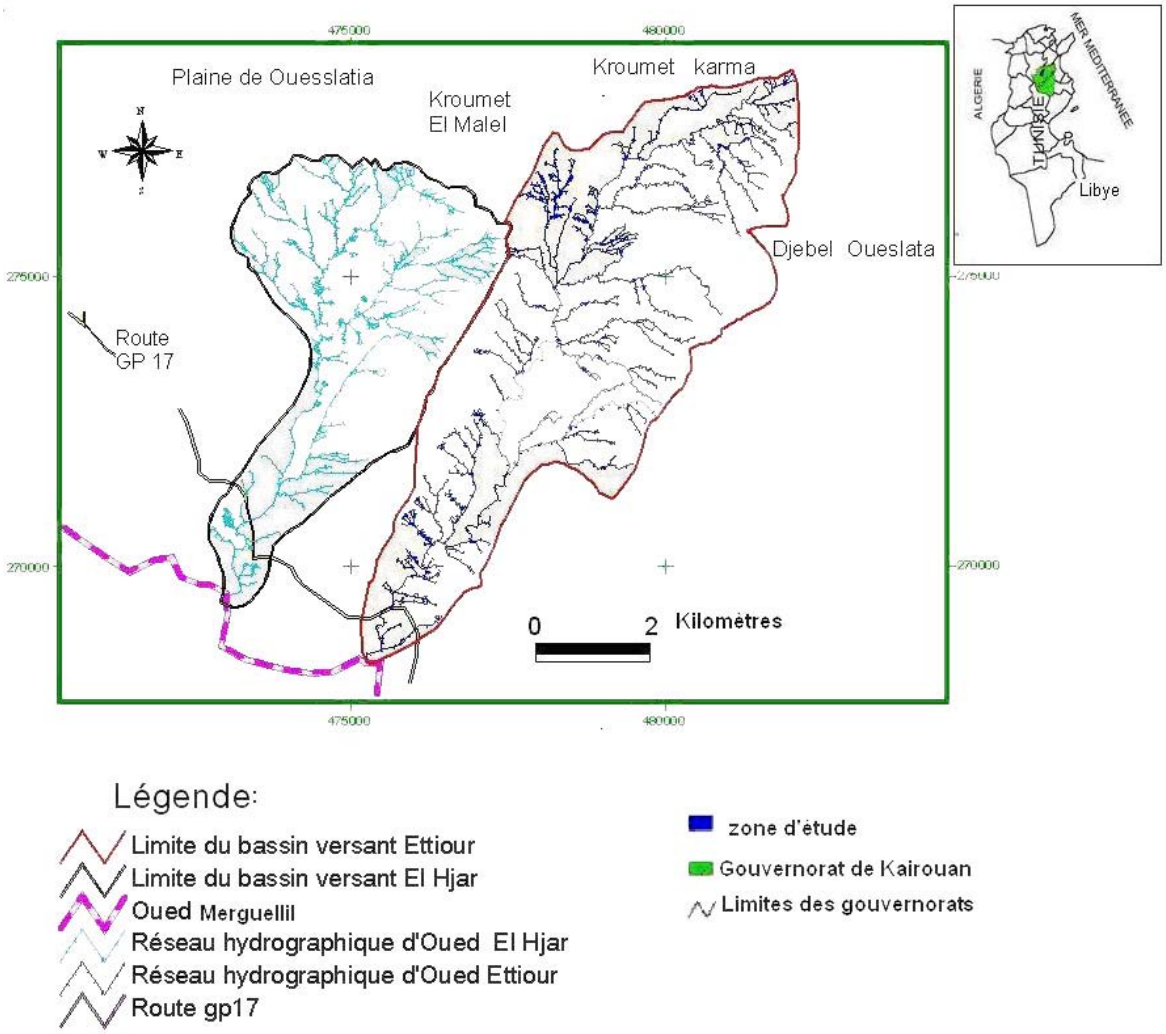



FIGURE 1 Localisation des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar (Tunisie Centrale). *Location of the Ettiour and El Hjar wadis watersheds (Central Tunisia).*

TABLEAU 1 Données de base et techniques utilisées pour la création du SIG. *Data and techniques used to create the GIS.*

| Données de base | Mode de captage | Source | Échelle | Date |
|---|---|---|---|---|
| Unité lithologique | Numérisation | Carte géologique<br>Prospection de terrain | 1/50 000 | 1995<br>2001 |
| MNA | Numérisation | Cartes topographiques | 1/ 50 000 | 1957 |
| Zone de pente | Analyse | MNA | 1/50 000 | 1957 |
| Aménagement de CES sur les versants | Restitution | Photographies aériennes<br>Relevés sur le terrain | 1/20 000 | 1989 |
| Aménagement des voies d'eau | Restitution | Carte thématique | 1/5 000 | 1990 |
| Réseau hydrographique | Restitution | Photographies aériennes | 1/20 000 | 1989 |

Les différentes couches d'informations provenant de l'interprétation des photographies aériennes, ajoutées à celles recueillies sur le terrain, ont été emmagasinées dans une base de données numé-rique. L'analyse de ces données nous a permis d'inventorier les différentes techniques d'aménage-ment réalisées pour la gestion et la CES dans les bassins versants étudiés. À travers la procédure requête, on interroge la base de données sur l'empla-cement des aménagements et la superficie des zones aménagées. On peut aussi faire des dénombrements et des représentations graphiques permettant d'ana-lyser la répartition spatiale des ouvrages en fonction des formations lithologiques.

### *3.1. Modèle numérique d'altitude (MNA)*

Les courbes de niveau de la carte topographique au 1/50 000 qui couvre la zone d'étude, ont été saisies sur une table à numériser à l'aide du logiciel *Arc/Info* avec une erreur moyenne de 3 m. Le fichier obtenu de format (e.00) a été exporté vers le logiciel Arcview, qui a permis la production du MNA sous forme de TIN (*Triangular Irregular Network*). Le MNA a ensuite servi à la rectification des photo-graphies aériennes et à l'élaboration de la carte des pentes.

### *3.2. Traitement des photographies aériennes*

Une quinzaine de photographies aériennes couvrant toute la zone d'étude ont été numérisées avec une résolution de 300 dpi. Elles ont subi une rectification tridimensionnelle à l'aide du logiciel *ERDAS Imagine*. Ce logiciel offre six modèles de correction géométrique : Affine, Polynomial, Rubber Sheetin, Camera, Landsat et SPOT. On a choisi le modèle Camera qui est spécifique à la correction géomé-trique des photographies aériennes. Ce modèle nous a permis d'introduire les composantes essentielles d'une orthorectification de photographie aérienne, qui sont les suivantes :

– les coordonnées des repères de collimation ;

– la distance focale f' = 159,3 mm ;

– le système de projection : Lambert conique con-forme ;

– les points d'appuis, qui sont des points facilement repérés sur les photographies aériennes, et dont les coordonnées sont parfaitement connues sur la carte topographique correspondante ;

– le MNA avec une précision de 3 m.

Les images provenant de cette orthorectification sont des ortho-images (figure 2) présentant une uniformité géométrique, avec une erreur quadra-tique moyenne de l'ordre 8 m, mais elles présentent un contraste entre deux images contiguës. Dans le but d'améliorer le contraste, on a effectué une nouvelle répartition des teintes de gris. En pratique, à l'aide du logiciel *ERDAS Imagine*, on applique un produit de filtrage entre une fenêtre glissante de taille réduite ($3 \times 3$). Chaque pixel a une nouvelle valeur radiométrique.

La transformation tricubique est appliquée à l'affectation des nuances de couleurs. La valeur radiométrique de chaque pixel est une moyenne pondérée des valeurs des neuf pixels environnants. Ce traitement des contrastes a permis d'obtenir une orthomosaïque où il est difficile de discerner les limites des images originales. L'image obtenue après traitement (figure 3) est une orthomosaïque. Elle est donc prête à être intégrée dans un SIG pour en extraire les différentes informations qu'elle contient.

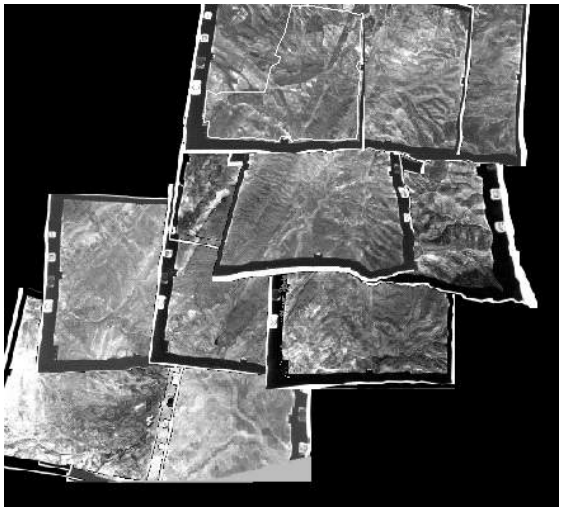


FIGURE 2 Mosaïque des ortho-images avant traitement. *Mosaic of the orthoimages before treatment.*

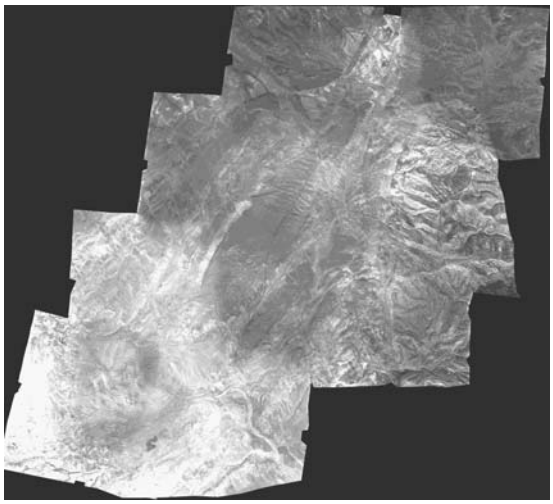


FIGURE 3 Orthomosaïque obtenue après traitement. *Orthomosaïque obtained after treatment.*

### *3.3. Intégration des données de base dans un SIG*

L'extraction et l'interprétation des données multi-sources disponibles nécessitent la mise en place d'un SIG, capable de répondre à nos objectifs. Pour ce faire, toutes les sources de données ont été intégrées dans un SIG sous forme de couches ou de couver-tures superposables. La couche principale est l'orthomosaïque sous forme matricielle qui a donné naissance aux différentes autres couches sous forme vectorielle, tel que le réseau hydrographique (poly-lignes), les aménagements en banquettes et en pierres sèches (polygones).

Les données à référence spatiale contenues dans les différentes couches, ajoutées à celles obtenues après la création des polygones peuvent être gérées, manipulées et exploitées à des fins d'analyses diver-ses et de répartition cartographique ou graphique.

### *3.4. Cartes thématiques numériques*

Les différents thèmes, soit géologiques, aménage-ments de CES, courbes de niveau et réseau hydro-graphique, ont été numérisés sous mode vecteur à l'aide du SIG. Ils sont présentés sous forme de quatre cartes thématiques : pentes, géologie, réseau hydrographique et aménagements de CES.

#### *3.4.1. Carte des pentes*

La carte des pentes est obtenue après traitement du MNA selon la méthode TIN à l'aide du SIG. Cette carte (figure 4), simple à élaborer, a une importance capitale dans la définition des unités pédologiques et des risques d'érosion. La pente est un facteur déterminant de l'érosion hydrique, elle intervient par son degré d'inclinaison, son profil et sa longueur.

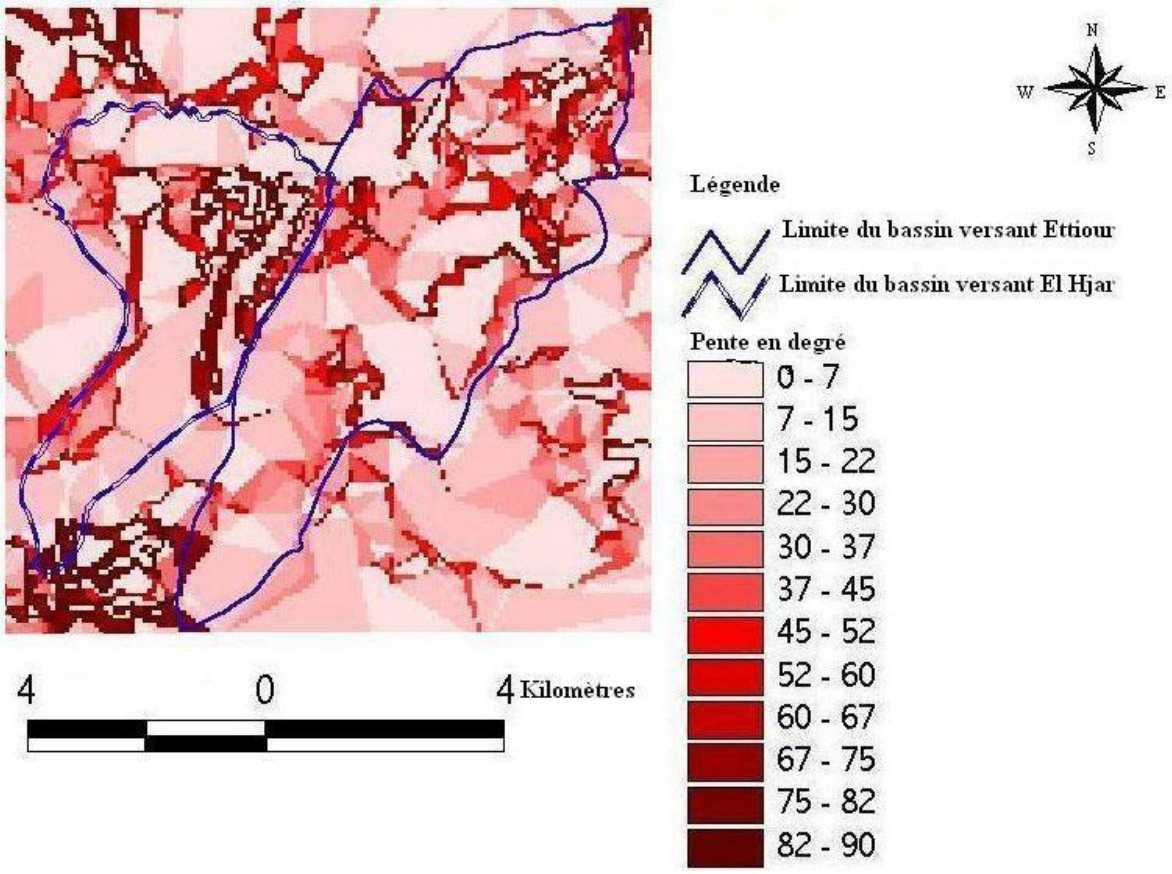



FIGURE 4 Carte de pentes des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Slope map of the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

### *3.4.2. Carte géologique*

La carte géologique est indispensable pour toute étude préliminaire des projets d'aménagement de CES. Elle illustre la répartition spatiale des différentes unités lithologiques.

La carte géologique de la zone d'étude a été élaborée à partir de la carte géologique au 1/50 000 de la région de Haffouz (El Ghali, 1995) pour la partie en aval des bassins versants et des photographies aériennes de 1989 et des vérification sur le terrain pour la partie amont, la carte géologique au 1/50 000 de la région de Djbel Bargou étant en cours de réalisation par l'Office National des Mines de Tunisie.

Cette carte (figure 5) illustre les différentes forma-tions lithologiques affleurantes dans le site. Elles sont formées en grande partie de calcaire, de marne et d'argile. Le calcaire, très fracturé et perméable de la formation de Métlaoui, couvre 38 % de la super-ficie du bassin versant de l'oued Ettiour et 33 % de la superficie du bassin versant de l'oued El Hjar. Les argiles marneuses des formations de Souar et de Chérihil, du Lutétien, occupant 40 % de la superficie du bassin versant de l'oued Ettiour et 53 % de la superficie du bassin versant de l'oued El Hjar. Le reste du territoire, qui ne dépasse pas 17 % de la superficie totale du site d'étude, est subdivisé entre les marnes de la formation d'El Haria, les grès de la formation Haouaria et les dépôts de sédiments fins carbonatés ou des sableux du Quaternaire (tableau 2).

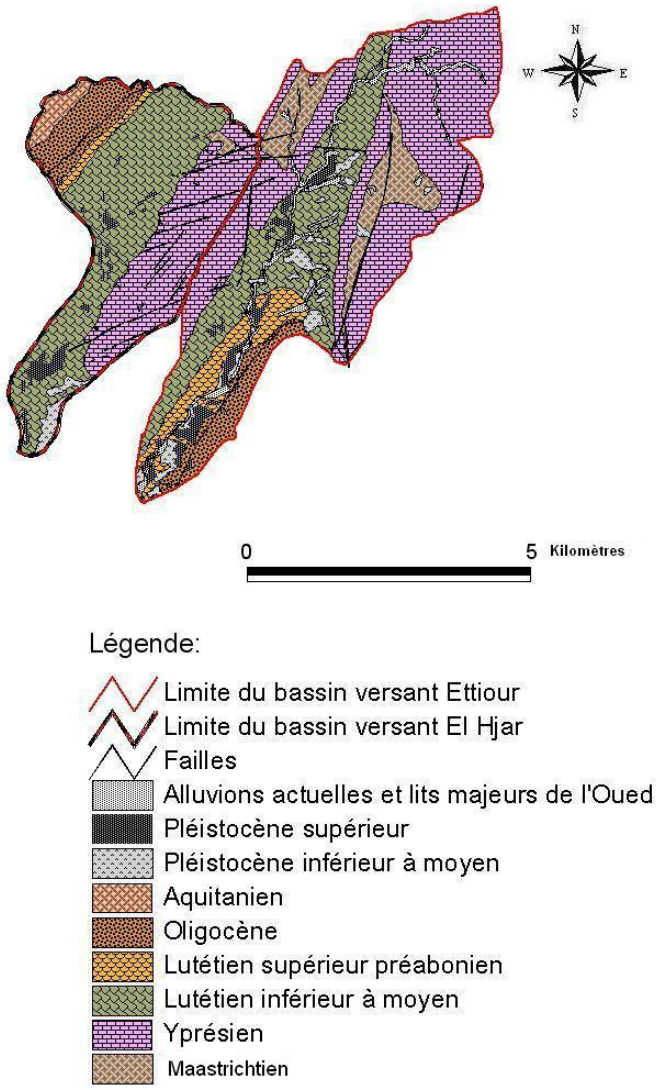



FIGURE 5 Carte géologique des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Geological map of the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

TABLEAU 2 Unités lithologiques des bassins versants d'Oueds Ettiour et El Hjar. *Lithologic units underlying Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

| **Âge et formation** | **Symbole** | **Caractéristiques lithologiques** |
|---|---|---|
| Quaternaire | $Q_p$ | Dépôts de travertins calcaires et sédiments fins à concrétions carbonatées, notamment des sables fins et des silts rouges. |
| Aquitanien ( Haouaria) | Ma | Séries détritiques avec alternances des sables feuilletées et de bancs de grès bioclastiques à ciment calcaire. |
| Oligocène (Chréchira) | O | Alternances de sables fins bioturbés blanc âcre, d'argile feuilletée verte à occurrences siliceuses, de grès et de calcaire très coquilliers. |
| Lutétien-supérieur-Priabonien (Souar) | $E_{L\text{-}P}$ | Série à dominance argilo-marneux, parfois très gypseuse, renfermant des débris d'huîtres ; elle est encadrée par des calcaires massifs à nummulites. |
| Lutétien inférieur à moyen (Chérahil) | $E_{(1\text{-}2)}$ | Série à dominance argilo-marneux, encadrée par des calcaires massifs à nummulites à la base et des sables bioturbés au sommet. |
| Yprésien (Métlaoui) | $E_y$ | Des calcaires noduleux bioclastique, calcaires massifs, durs, bioturbés et livrant de rares nummulites. |

| | | |
|---|---|---|
| Maestrichien-Paléocène (El Haria) | $C_{m-p}$ | Marnes de couleur noirâtre à gris verdâtre et renfermant des nodules de gypse lamellaire avec quelques intercalations minces de calcaire à lumachelle. |

*3.4.3. Carte du réseau hydrographique*

Le réseau hydrographique relatif aux oueds concernés a été cartographié et numérisé à partir de l'orthomosaïque (figure 3). Cette carte (figure 6) permet de déterminer la répartition des oueds et la densité de drainage relative aux différentes unités lithologiques. Elle est très intéressante pour l'élabo-ration des plans d'aménagement hydraulique, par exemple pour la réalisation de petits barrages collinaires ou pour des seuils déversoirs au niveau des voies d'eau.

*3.4.4. Cartes des aménagements de CES*

La source principale pour l'élaboration des cartes est l'orthomosaïque. Sur la figure 7, on présente la carte des aménagements de CES. Cette carte a été croisée avec la carte géologique des bassins versants (figure 8), puis on a découpé chaque type d'aména-gement en fonction de l'unité lithologique corres-pondante. Ainsi, les cartes obtenues (figures 9 et 10), nous renseignent sur l'emplacement et la superficie exacte de ces aménagements. Ces dernières cartes ont une importance capitale pour l'élaboration de l'inventaire des aménagements de CES. En effet, chaque unité ou thème est lié à une base de données qui contient sa superficie ou sa longueur relative. Cette base de données permet donc d'effectuer des analyses statistiques.

## 4. ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

En fonction du type de milieu concerné par les aménagements, on distingue les aménagements des versants et ceux sur les cours d'eau. Cette subdi-vision est simple et met l'accent sur la variabilité des aménagements en fonction des situations géomor-phologiques.

Les versants des montagnes ne présentent ni les mêmes caractéristiques au niveau de leur potentiel en sols et en réserves hydriques, ni le même comportement morphodynamique. Ils ne posent donc pas les mêmes problèmes pour leur aménagement. Les principaux types d'aménagements sur les versants sont les banquettes de terre et les cordons en pierres sèches. On note aussi la présence d'autres types d'aménagements tel que les cuvettes indivi-duelles créées au niveau de chaque plant d'arbre cultivé (olivier, abricotier) et les murettes qui se distinguent des cordons en pierres sèches par leur mode construction et par les matériaux qui les composent. En effet, à la différence des cordons, les murettes sont construites, cimentées entre elles et la granulométrie du matériel qui les compose est fine. Ces deux derniers types d'aménagements, cuvettes individuelles et murettes, s'étendent sur des surfaces très restreintes, ce qui rend difficile leur représen-tation sur les cartes des aménagements.

Les aménagements sur les cours d'eau sont les seuils-déversoirs en béton, les seuils en gabions et les seuils en pierres sèches. Il est très difficile de distinguer les différents types de seuils au niveau du cours d'eau à partir des photographies aériennes à l'échelle de celles qui sont disponibles, seul le travail sur le terrain a permis de les différencier.

### *4.1. Inventaire des aménagements de CES*

*4.1.1. Banquettes de terre*

Une banquette peut être définie comme une butte de terre de largeur réduite et constante (3 à 4 m), de longueur inférieur à 400 m, de hauteur moyenne 1,3 m, avec un fossé très évasé et un bourrelet à la base du talus amont. Installée sur un versant cultivé, elle a pour but d'intercepter les eaux de ruissellement et de limiter l'érosion (Heusch, 1986).

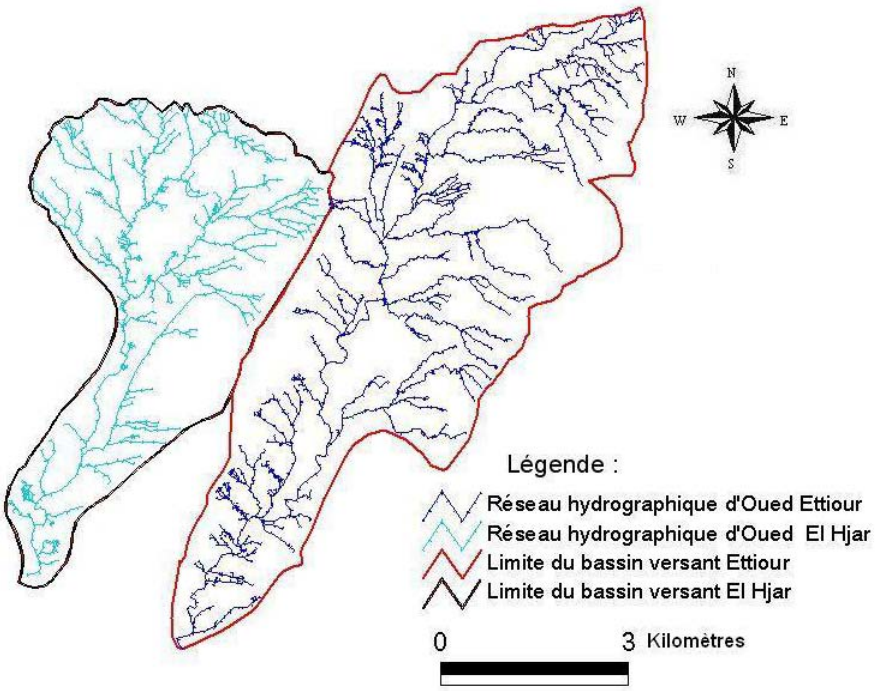



FIGURE 6 Carte du réseau hydrographique des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Map of the hydrographic network of the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

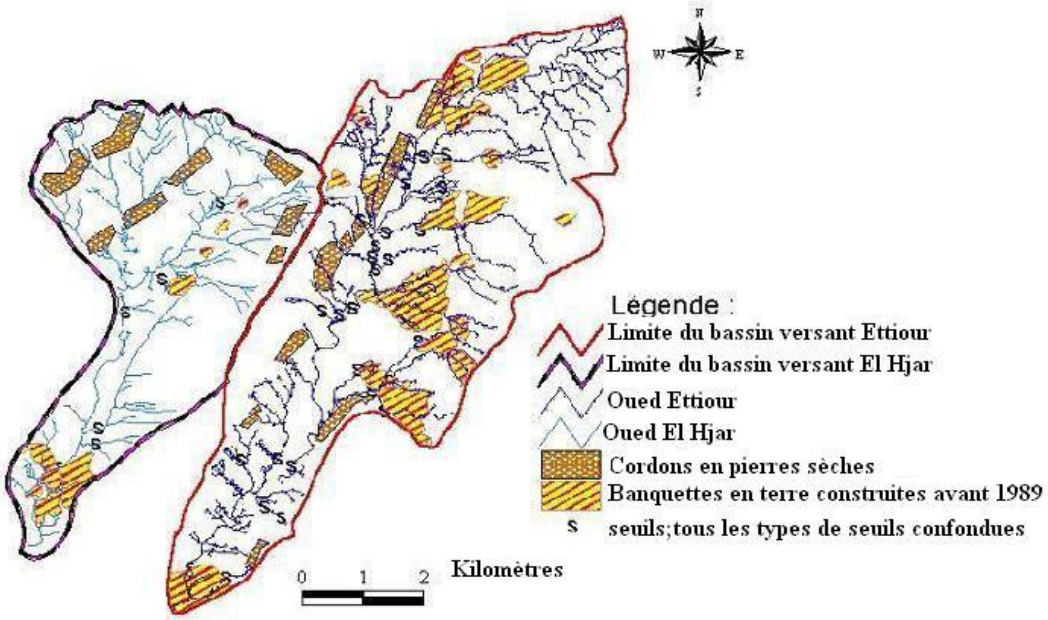



FIGURE 7 Carte des aménagements de CES construits avant 1989 dans les bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Map of soil and water conservation works built before 1989 in the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

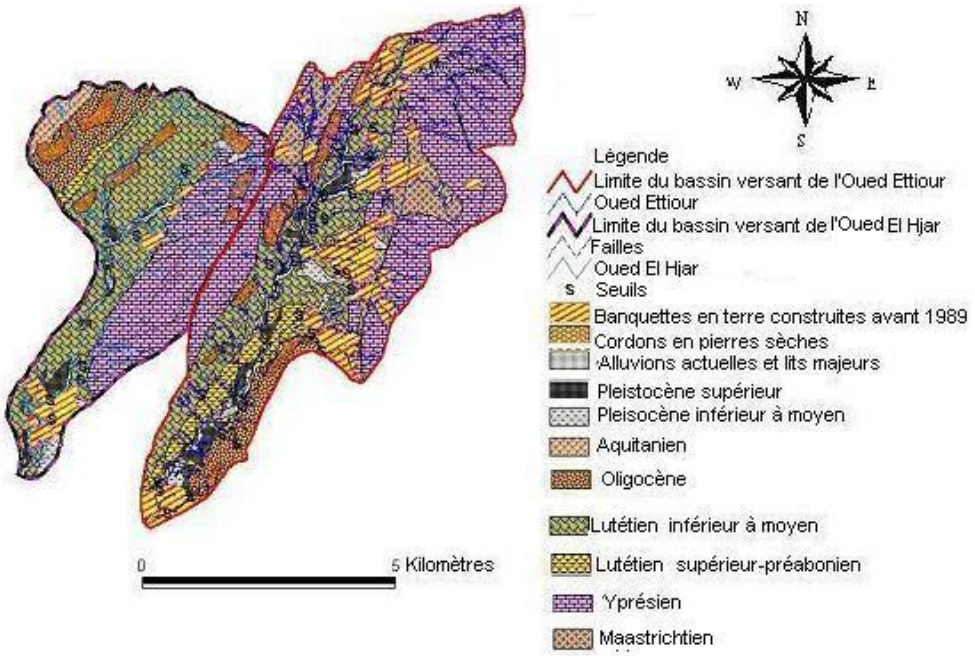



FIGURE 8 Superposition de la carte des aménagements de CES antérieurs à 1989 sur la carte géologique des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Overlaying of the before 1989 soil and water conservation works map on the geologic map of the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

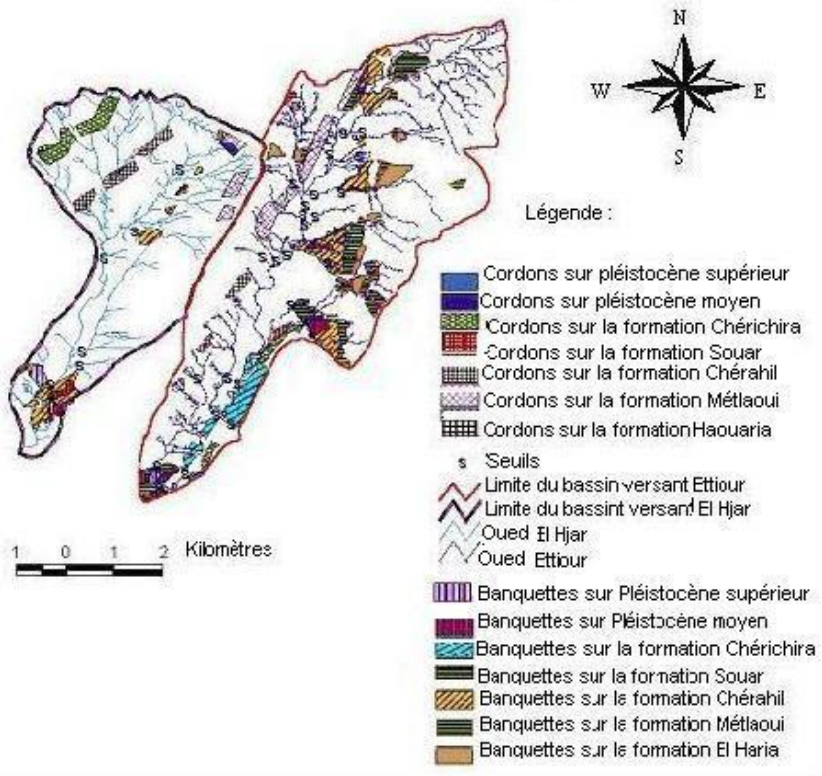



FIGURE 9 Carte des aménagements de CES antérieurs à 1989 par unités lithologiques dans les bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Segmentation of the before 1989 soil and water conservation works map by lithologic units in the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

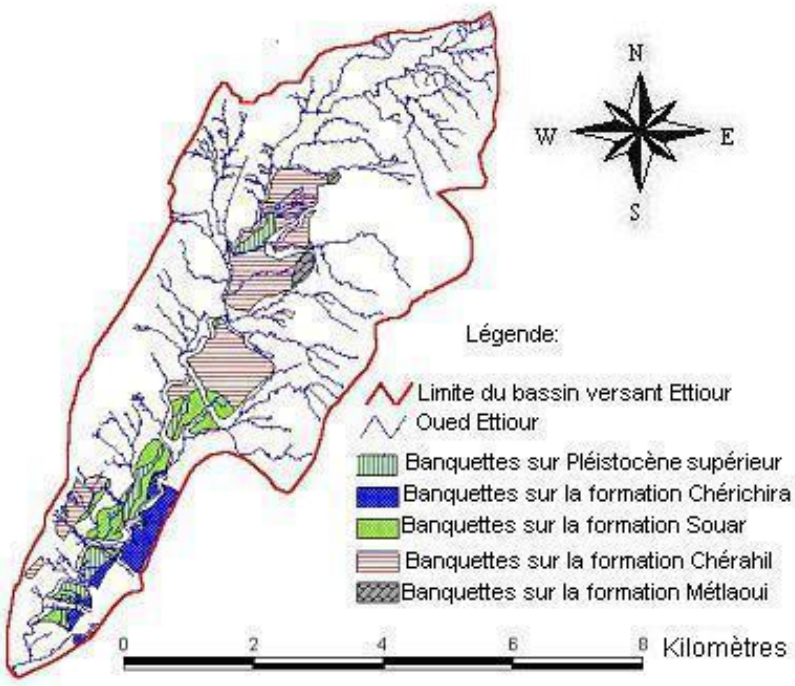



FIGURE 10 Carte des aménagements de CES réalisés en 2000-2001 par unités lithologiques dans le bassin versant de l'oued Ettiour. *Soil and water conservation works map carried out in 2000-2001 by lithologic units in the Ettiour wadi watershed.*

Tous les aménagements en banquettes effectués avant 1989 (figure 9) dans les deux bassins versants couvrent une superficie de 434 ha. Ils sont en très mauvais état en 2001. La dégradation effectuée par le bétail explique en partie leur mauvais état. Cette dégradation facilite le débordement des eaux de ruissellement pendant les périodes des crues. Ces aménagements devraient donc être reconstruits ou réhabilités.

Nous avons constaté la persistance de quelques aménagements antérieurs à 1989 dans la partie en aval du bassin versant de l'oued Ettiour et noté leur efficacité par le comblement des fossés préexistants en amont des banquettes et la cicatrisation d'anciens ravinements.

Les banquettes actuelles, réalisées pour la plupart durant les années 2000 et 2001 (figure 10), sont adaptées à des pentes de 5 à 12 % sur un sol suffi-samment profond. Cependant, la superposition de la carte des pentes à celle des aménagements en banquettes (figure 11) nous a montré l'existence de certaines anomalies (Baccari, 2001), en particulier l'utilisation d'un même espacement entre les banquettes pour différentes pentes du terrain.

Les banquettes réalisées par le Ministère de l'agri-culture suivent strictement les courbes de niveau. Elles ont une base de 3 m, une hauteur presque uniforme dépassant de 1 m la surface du sol pour tous les types de pente et tous les types de sols. La construction des banquettes a provoqué des pertes en terre cultivée par le décapage du sol arable. La Direction de CES a tenté des expériences de conso-lidation biologique, par le Cactus et l'Acacia cyano-phylla, pour compenser la perte de terrain et contribuer à la stabilisation du talus de la ban-quette.

En 1989, la surface aménagée en banquettes dans le bassin versant de l'oued Ettiour a été estimée à 434 ha dont 31 % sur le calcaire de la formation de Métlaoui ($E_y$) et 42 % sur les marnes de la formation de Chérahil ($E_{L(1-2)}$ et $E_{L\text{-}p.}$). La surface aménagée restante est répartie sur des sols alluviaux du Quaternaire et sur les marnes de la formation d'El Haria ($C_{m\text{-}p}$). Actuellement, la surface aménagée en banquettes dans le bassin versant de l'oued Ettiour (3 250 ha) est estimée à 638 ha, dont une grande partie a été réalisée en 2001.

Les histogrammes des surfaces des figures 12 et 13 montrent bien la régression des surfaces

aménagées en banquettes sur les sols calcaires de la formation de Métlaoui (Ey). Elles passent de 10 % en 1989 à 1 % en 2001. Les terres sur les calcaires de la formation de Métlaoui sont des terres à vocation de parcours occupées en commun par toute la collectivité. Le traitement de ce type de terre par des ouvrages de CES n'étant pas soumis à l'accord de la population, l'administration y a souvent libre accès pour les travaux de CES. Par conséquent, avant 1989, de grandes superficies de ces terres ont été traitées avec des banquettes de terre. Il en reste peu en 2001, car la situation foncière collective ou domaniale de ces terres a contribué au mauvais entretien et à la destruction de ces ouvrages. En 2001, très peu d'ouvrages ont été réalisés sur cette formation. Les lithosols, qui caractérisent ces affleu-rements rocheux, ne conviennent pas à des traitements au moyen de banquettes dont la création est actuellement liée à une mise en valeur agricole.

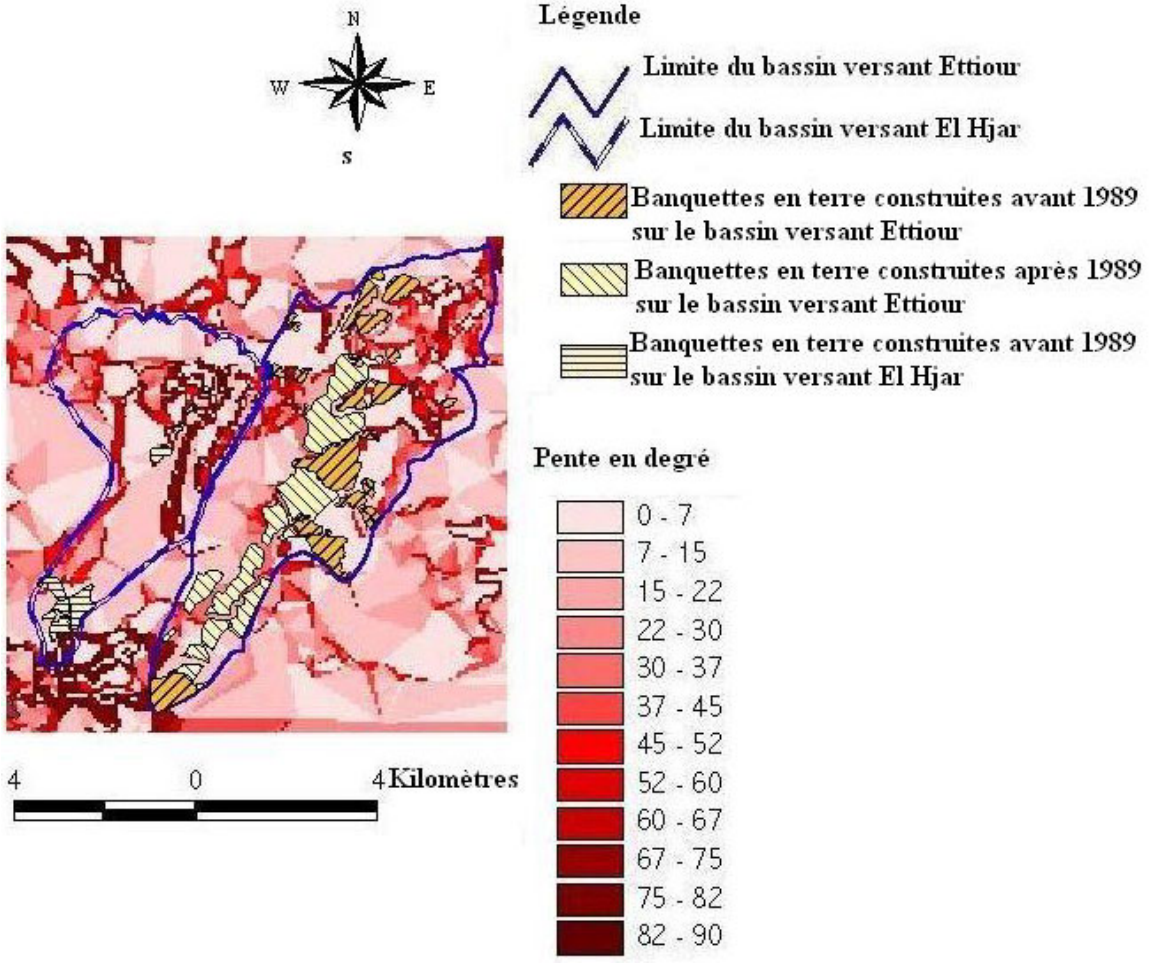



FIGURE 11 Superposition de la carte des aménagements de CES antérieurs à 1989 sur la carte de pentes des bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar. *Overlaying of the 1989 soil and water conservation works map on the slope map of the Ettiour and El Hjar wadis watersheds.*

Bien que les aménagements au moyen de banquettes sur les formations marneuses soient prohibés ou ne soient pas conseillés, la superficie traitée par des banquettes augmente entre 1989 et 2000 de 14 % à 34 %, dépassant ainsi le pourcentage moyen des aménagements au moyen de banquettes sur tout le bassin versant, lequel s'élève à 20 % en 2001. Il semble que, dans son intervention récente pour les travaux de banquettes, l'administration a tenu plus compte de la vocation des sols que de la nature des matériaux. En effet, ces sols marneux

conviennent bien à la céréaliculture mais les fentes de retrait, qui se développent en été dans le bourrelet des banquettes, les rendent inadaptées pour la rétention des eaux de ruissellement. La rupture du bourrelet est souvent provoquée par le phénomène de suffusion. Ces aménagements au moyen de banquettes, efficaces sur des sols non argileux et sur un substrat meuble quaternaire, ont été réalisés sur des sols argileux durant les années 2000 et 2001 malgré les risques de rupture. Cette augmentation est particulièrement nette sur les sols du Quaternaire (Qp3 et Qp2), souvent cultivés par les agriculteurs privés. La nouvelle approche d'inter-vention de l'administration chez les agriculteurs privés a donc privilégié l'extension des travaux de CES sur les sols à vocation agricole mais sans tenir compte de la nature des sols.

Les surfaces aménagées en banquettes dans les années 1970 ont été estimées sur le terrain car il est très difficile de les distinguer sur les photographies aériennes. Seuls certains vestiges apparaissent sur les sommets des versants. La superficie occupée par ces vestiges est estimée à 5 % de la surface totale du bassin versant. L'administration n'a pas procédé à leur réhabilitation parce qu'ils sont situés sur des sols marneux et des sols superficiels.

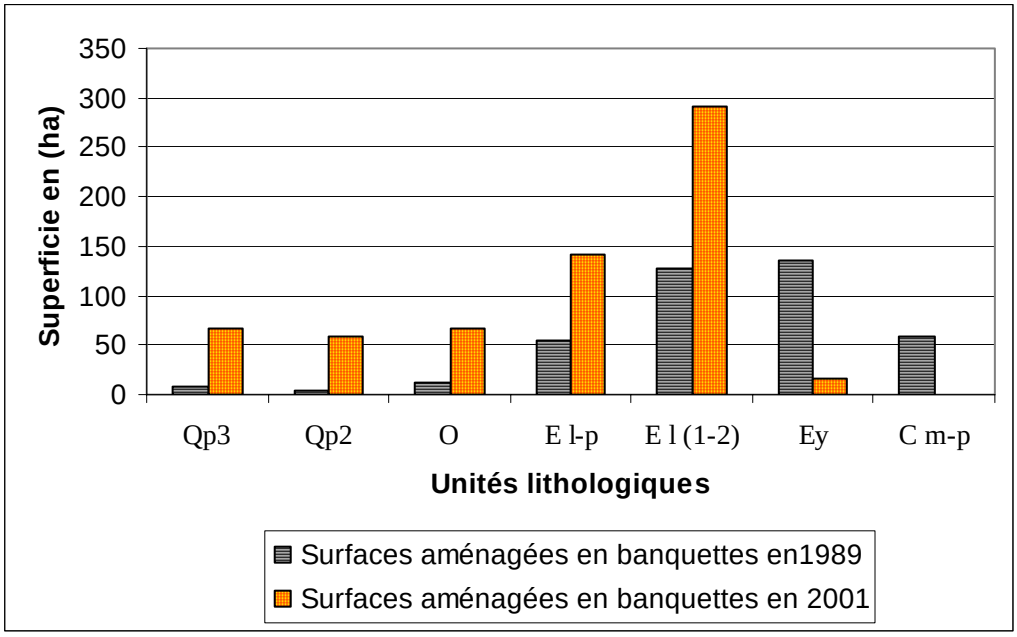



FIGURE 12 Répartition des aménagements en banquettes par unités lithologiques du bassin versant de l'oued Ettiour en 1989 et en 2001. *Distribution of the terraced area by lithological units of the Ettiour wadi watershed in 1989 and 2001.*

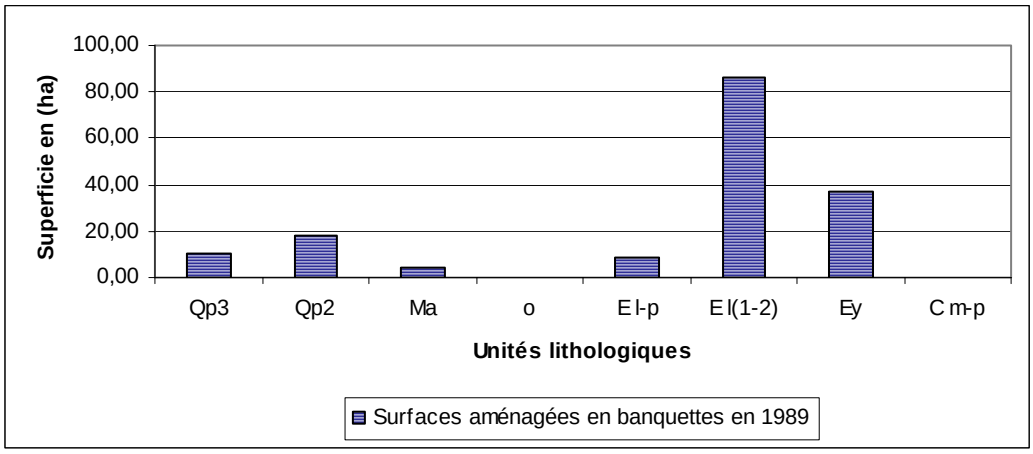



FIGURE 13 Répartition des aménagements en banquettes par unités lithologiques dans le bassin versant de l'oued El Hjar en 1989. *Distribution of the terraced area by lithological units in the El Hjar wadi watershed in 1989.*

Les travaux de terrain menés sur les deux bassins versants montrent que les aménagements au moyen de banquettes ont une efficacité limitée dans le temps, sauf en de rares endroits et ceci pour plusieurs causes dont les deux principales sont le climat et la lithologie. Les pluies de fréquence exce-ptionnelle, par exemple, dont la période de retour est de 10 ans, saturent complètement les sols et génèrent de forts ruissellements très chargés en particules solides. Ces dernières sédimentent en amont des banquettes, contribuant ainsi au comble-ment rapide des fossés. Ces fortes crues provoquent fréquemment des ruptures de banquettes par submersion des talus. Une autre cause de rupture est l'emmagasinage des eaux au fond du fossé de la banquette de rétention qui se comporte comme un barrage en terre non compactée sans déversoir aménagé. Il peut alors y avoir rupture par mouve-ment de masse d'une partie des talus par petites loupes de glissement vers l'aval, avec tassement des talus et création de points de faiblesse. Pour les sols à argiles gonflantes, on observe fréquemment des renards dans les talus. Ces renards sont créés en automne par l'infiltration des eaux de ruissellement dans les fentes de retrait formées dans les talus par le processus de dessiccation estivale.

#### *4.1.2. Cordons et murettes en pierres sèches*

La technique de construction de cordons et murettes est fréquente sur les versants à forte pente et sur les sols peu profonds. Les pierres utilisées pour leur construction viennent toujours des champs exploités. Elles sont disposées les unes sur les autres, formant ainsi des lignes superposées. Chaque cordon a une hauteur de 20 à 50 cm et une largeur de 40 à 60 cm. Ces structures s'observent sur le versant droit de l'oued Ettiour et le versant gauche de l'oued El Hjar.

Au niveau de la partie médiane de l'oued Ettiour, on a noté la présence de murettes en pierres sèches. Ces murettes sont réalisées par des agriculteurs le long de la pente, mais sur des surfaces très réduites. Elles sont destinées à réduire la vitesse du ruissellement et à arrêter les sédiments qui l'accom-pagnent. À mesure que l'épaisseur du dépôt de sédi-ments derrière le murette augmente, on ajoute de nouvelles pierres pour augmenter la hauteur de la murette, ce qui, finalement, conduit à construire une terrasse plane. Ces murettes sont extrêmement efficaces pour améliorer les terrains de parcours notamment dans les zones montagneuses nues et pierreuses (Ben Salem, 1986).

Pour le bassin versant de l'oued Ettiour, les amé-nagements en pierres sèches sont bien répartis sur les différentes unités lithologiques (figure 14). Elles occupent une superficie de 128,8 ha dont 64 % sont installés sur la formation calcaire ($E_y$) et 15 % sur les sols marneux ($E_{L\,(1\text{-}2)}$).

Sur le bassin versant d'oued El Hjar les aména-gements en pierres sèches occupent une superficie de 114 ha dont 19 % sont installés sur la formation calcaire ($E_y$) et 47 % sur les sols marneux ($E_{L\,(1\text{-}2)}$), comme le montre la figure 15.

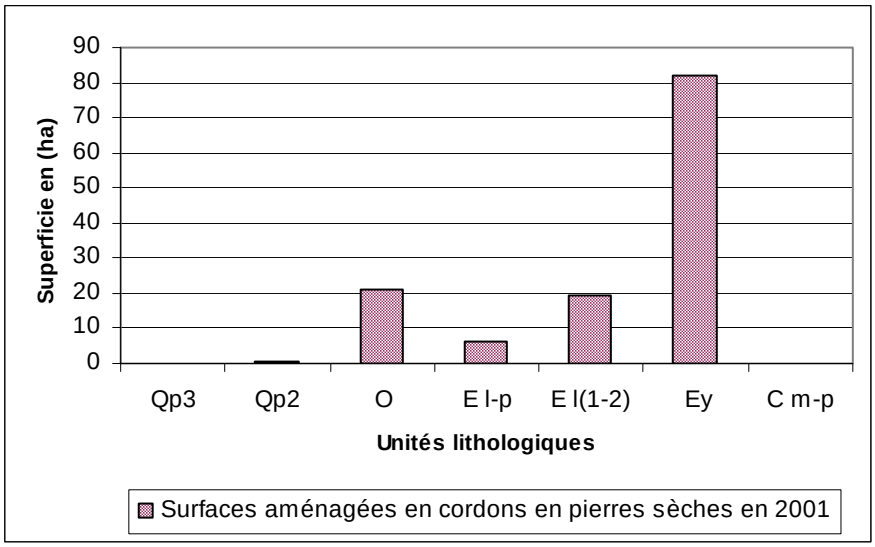



FIGURE 14 Répartition des surfaces aménagées au moyen de cordons en pierres sèches dans le bassin versant de l'oued Ettiour en 2001 en fonction de la lithologie. *Distribution of stone terraces in the Ettiour wadi watershed in 2001 in regard to lithology.*

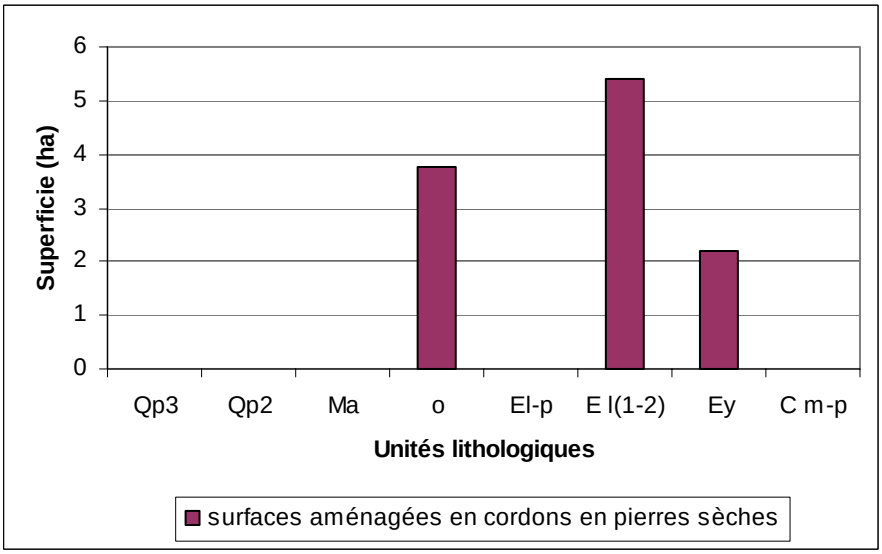



FIGURE 15 Répartition des surfaces aménagées par des cordons en pierres sèches dans le bassin versant de l'oued El Hjar en 1989 en fonction de la lithologie. *Distribution of stone terraces in the El Hjar wadi watershed in 1989 in regard to lithology*.

#### *4.1.3. Cuvettes individuelles*

Les cuvettes sont des micro-banquettes en demi-lune placées autour des arbres fruitiers ou des cuvettes de plantation avec des ados créés par le rejet des emprunts. Ce système est utilisé surtout dans la partie nord-ouest de l'oued Ettiour, là où les terrains sont fortement accidentés et où la pente dépasse 40 %. Ces cuvettes ont un diamètre de 2 à 6 m, ce qui permet de collecter l'eau de ruissellement sur une superficie moyenne de 16 m$^2$. Le risque de colmatage de ces cuvettes est élevé. Pour certains arbres, à cause de la charge solide de ruissellement, il s'y forme rapidement des croûtes peu perméables (Roose, 1994).

*4.1.4. Ouvrages de CES sur les cours d'eau*

Les principaux aménagements observés dans les ravins des bassins versants étudiés sont les seuils filtrants en gabions, les seuils en pierres sèches et les seuils déversoirs en béton. Ces aménagements, comme leur nom l'indique, sont utiles pour évacuer l'eau ruisselée en toute sécurité sans qu'elle n'érode le ravin. Sur les photographies aériennes, nous avons détecté la présence des seuils au niveau des bassins versants étudiés, mais nous avons hésité dans l'identification des différents types de seuils. Au cours de nos prospections sur le terrain, nous avons pu vérifier la présence de deux seuils déversoirs en béton. Le premier seuil est situé à l'aval du bassin versant de l'oued Ettiour, sur un fond argileux gypseux de la formation de Souar ($E_{l\text{-}p}$), le second est implanté à l'aval de l'oued El Hjar, sur un fond argileux de la même formation.

La Direction de la conservation des eaux et du sol (D/CES) a implanté 7 seuils filtrants en gabions au niveau de l'oued El Hjar et 6 ouvrages dans le lit de l'oued Ettiour. Ces aménagements ont été réalisés en 1990 après la prise de photographies aériennes de 1989 dans le cadre d'un projet de protection du barrage d'El Haouareb destiné à l'alimentation de la nappe de Bouhafna (D/CES., 1990). La localisation de ces seuils coïncide avec les différentes formations lithologiques le long des ravins. L'objectif de ces ouvrages en pierres sèches est la réduction de l'érosion par ravinement et la stabilisation de la pente des ravins. Au niveau des oueds Ettiour et El Hjar, ces ouvrages sont fréquents, particulièrement sur les ravins à forte pente.

### *4.2. Changements dans la stratégie d'aménagement des bassins versants*

Le régime foncier incertain, la façon de faire valoir des terres et le morcellement des propriétés ont constitué des contraintes à l'adoption de techniques de CES sur les terres agricoles cultivées, le plus souvent sur les formations du Quaternaire.

Depuis 1990, la stratégie de la Direction de CES a consisté à intégrer de plus en plus les techniques de CES dans les outils technologiques proposés aux exploitants agricoles (Lebreton, 1999). L'approche participative a permis aux techniques physiques de CES de s'introduire de plus en plus à l'intérieur de la ferme et non plus seulement dans les fermes margi-nales collectives. L'objectif principal de la nouvelle stratégie de CES est de réduire les pertes en terres cultivées ainsi que d'améliorer la fertilité et le bilan hydrique des sols. Le deuxième objectif est de pro-téger l'infrastructure existante à l'aval du bassin versant et de mobiliser les ressources en eaux de surface.

La période 1956-1989 a vu beaucoup de travaux de CES réalisés sans aucune étude socio-économique préalable. Ces travaux de CES ont été réalisés pour résoudre temporairement des problèmes sociaux liés au chômage de la population rurale. Ils ont égale-ment permis de limiter temporairement, pour une dizaine d'années, le ruissellement et l'érosion des terres collectives

La période 1989-2001 a vu une amélioration et un développement considérable dans la programmation, la planification, l'étude et l'exécution des projets de CES ( PNUD/FAO, 1991). Ceci a amélioré l'efficacité des travaux réalisés dans cette seconde période.

Notre inventaire des aménagements sur les bassins versants des oueds El Hjar et Ettiour mon-tre clairement que les travaux de conservation des eaux et du sol réalisés n'ont pas toujours été efficaces pour les raisons suivantes :

– le manque de cartes pédologiques et d'occupation du sol aux échelles habituellement utilisées pour l'aménagement des versants (1/20 000) ;

– les aménagements sont souvent réalisés sans aucune connaissance de la distribution des sols à l'échelle du bassin versant, faute d'une couverture pédologique précise ;

– l'absence d'étude préliminaire tenant compte des mutations socio-économiques qui se traduisent sur le terrain par des changements d'occupation des sols ;

– l'existence de certains facteurs limitant liés à la salinité, à la très forte pente ou à la roche mère affleurant sur des grandes étendues.

Pour une meilleure gestion de l'environnement, il paraît donc nécessaire d'intégrer, dans une seule base de données, les différents facteurs intervenant dans la planification des projets d'aménagements des bassins versants. L'ensemble des données multi-sources, gérées au sein d'un SIG, permet, outre les fonctions classiques de gestion, de consultation et de mise à jour de ces bases, l'extraction et la production des sorties thématiques graphiques facilitant la gestion de l'espace rural. Ce cadre méthodologique, proposé pour la caractérisation spatiale des aména-gements de conservation des eaux et du sol, peut être généralisé dans tout le pays.

## 5. CONCLUSION

La présente étude constitue une contribution à un effort de recherche méthodologique visant l'établis-sement d'inventaires des aménagements

de CES en Tunisie centrale. Le mosaïquage des photographies aériennes constitue une clé fondamentale dans toute tentative menée pour inventorier les aménagements des bassins versants. Il assure une vue synoptique du territoire et permet par conséquent une étude globale et exhaustive.

Dans notre étude, nous avons pu surmonter le mosaïquage classique communément adopté dans les travaux existant vers un mosaïquage automa-tique ayant l'avantage d'être à la fois rapide et efficace.

Les photographies aériennes sont largement utilisées pour effectuer le mosaïquage en raison de leur haute résolution mais également de leur coût raisonnable comparé à celui des images satellitaires. Elles nous permettent en particulier de distinguer les différents types d'aménagement et d'interpréter leurs structures.

Les informations déduites à partir de la mosaïque ainsi que les données altimétriques fournies par les cartes topographiques sont intégrées dans un SIG. Ceci nous a permis de bien gérer la grande quantité de données mise à notre disposition et de profiter de la complémentarité entre différentes sources d'informations. Les résultats obtenus ont été corrigés et validés par de la réalité de terrain.

La base de données finale, constituée principalement des informations extraites à partir de l'ortho-mosaïque, après réalisation des travaux de terrain, mais également des diverses cartes thématiques disponibles y compris la carte topographique, per-met :

– de visualiser les différents types d'aménagements ;

– de définir des relations entre les thèmes cartographiques et les types d'aménagement ;

– d'estimer les superficies des zones aménagées.

Nous avons ainsi constaté, sur les bassins versants des oueds Ettiour et El Hjar en Tunisie centrale, qu'avant 1989 la majorité des aménagements en banquettes de terre effectués ne sont pas adaptés aux conditions pédologiques des sols argileux sur marnes, très répandus dans cette région. Ceci a contribué à la destruction et à l'inefficacité des aménagements réalisés en 1989 et dont nous avons fait l'inventaire en 2001.

En ce qui concerne l'intégration des aménagements de CES dans l'objectif de mise en valeur agricole, une nette amélioration a été constatée avec le développement de la stratégie nationale mise en œuvre par la D/CES à la fin des années 1980, qui privilégie la démarche participative des agriculteurs locaux. Néanmoins, les techniques classiques de construction des banquettes de terre et des cordons en pierres sèches prédominent encore dans les aménagements de CES sur les terres agricoles du centre de la Tunisie, alors qu'il faudrait proba-blement les remplacer par les techniques douces des bandes enherbées et de semis direct. À l'exception de quelques plantations de consolidation des banquettes, les techniques biologiques de CES sont en effet encore trop négligées.

***Remerciements***

Mes remerciements à M. Habib FARHAT (D/CES) et M. jean-Marie LAMACHÈRE (IRD), qui ont mis à ma disposition certaines données nécessaires pour l'élaboration de cette étude.

***Références***

Baccari, N. (2001) Méthodologie d'inventaire d'aménagement des bassins versants se basant sur les images aérospatiales. Mémoire de DEA, Université de Tunis, Tunis, 74 p.

Ben Salem, B. (1986) Exemples de pratiques de conservation des sols et des eaux en Algérie, au Maroc et en Tunisie. Document n° 86, Bulletin pédologique de la FAO n° 33, Rome, p. 67-76.

Direction de CES (1990) Aménagements des voies d'eau du bassin versant d'Oued Merguellil. Protection du barrage El Haoureb et alimentation de la nappe de Bou Hafna. Rapport du projet, Ministère de l'Agriculture de Tunisie, Tunis, 10 p.

EL Amami, S. (1984) Les aménagements hydrauliques traditionnels de Tunisie. Centre de recherche du génie rural, Tunis, 69 p.

El Ghali, A. (1995) Notice explicative de la carte géologique de HAFFOUZ. Office National des Mines. Tunis, Tunisie. Carte n° 62, p. 19-20.

Heush, B. (1986) Cinquante ans de banquettes de (DRS), CES en Afrique du nord un bilan. Cahier ORSTOM, série pédologique, vol. XVII, n° 2, p. 153-162.

Lebreton, L. (1999) Un système d'information à références spatiales comme outil d'aide à la gestion intégrée de l'eau en Tunisie centrale. Mémoire de DEA, ENSA, Toulouse, 118 p. + annexes.

PNUD/FAO (1991) Rapport dévaluation sur les techniques de CES en Tunisie. Projet PNUD/FAO TUN 86-020, Ministère de l'Agriculture de Tunisie, Tunis, 90 p.

Roose, E. (1994) Introduction à la gestion de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). Bulletin pédologique de la FAO n° 70, Rome, 421 p.

Snane, M.H., Mechergui, M. et Hamza, M.H.(1988) Application de la méthode des sous facteurs pour l'estimation de l'impact de certaines techniques de reboisement sur l'érosion du sol dans les zones sub-humides et humides de la Tunisie. Revue Forêt méditerranéenne, Tome X, n° 2.