IDENTIFICATION DU RISQUE DE BRÈCHE DES BANQUETTES ANTI-ÉROSIVES EN RÉGION SEMI-ARIDE TUNISIENNE À L'AIDE D'ORTHO-IMAGES AÉRIENNES ET DE DONNÉES MULTISOURCES DANS UN SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

Noamene BACCARI[1], Mohamed Rached BOUSSEMA[1], Jean-Marie LAMACHÈRE[2] et Slah NASRI[3]

[1] Laboratoire de télédétection et systèmes d'information à référence spatiale, École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie.
Téléphone : 216 71 874 700 ; télécopieur : 216 71 111 111 ; courriel : noamene_b@yahoo.fr
[2] Institut de recherche pour le développement (IRD), B. P. 434, 1004 El Menzah 4, Tunis, Tunisie.
Téléphone : 216 71 750 009 ; télécopieur : 216 71 75 02 54 ; courriel : jean-marie.lamachere@ird.intl.tn
[3] Institut national de recherche de génie rural, eau et forêt (INRGREF), avenue Hédi Karray, Ariana, Tunis.
Téléphone : 216 71 719 630 ; télécopieur : 216 71 717 951 ; courriel nasri.salh@iresa.agrinet.tn

Soumis le 15 janvier 2007 ; révisé le 28 février 2007 ; accepté le 21 mai 20072007 - © *Revue Télédétection*, 2007, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 405-417

Résumé

Dans la zone semi aride tunisienne, un million d'hectares a été aménagé avec des banquettes antiérosives. Une banquette peut être définie comme une levée de terre de largeur réduite et constante, avec un fossé très évasé. Celle-ci est installée sur les versants et deux banquettes délimitent une bande de culture qui sert d'impluvium à la banquette aval. La caractérisation des causes de brèche des banquettes anti-érosives a pour but de favoriser une gestion plus durable des eaux et du sol à l'échelle du bassin versant. Une étude a été menée sur le petit bassin versant de l'oued d'El Gouazine, en Tunisie centrale, pour identifier les principales causes de brèche des banquettes anti-érosives en utilisant des ortho-images aériennes de l'année 2001, des cartes thématiques (lithologie, occupation des terres, topographie) et des observations sur le terrain, toutes ces données étant intégrées dans un SIG. Avec l'image HRV(XS) de SPOT-4, d'une résolution au sol de 20 m, il n'a pas été possible de détecter les aménagements en banquettes de terre d'une largeur de 4 à 6 m. Lors d'une campagne de mesures réalisée en août 2005 sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine, l'utilisation d'un GPS a permis de localiser 109 cas de brèches sur un total de 439 banquettes construites au cours des années 1996 et 1997, ce qui signifie qu'une banquette sur quatre est endommagée après huit années d'existence. L'analyse des causes de brèche des banquettes montre qu'il existe trois causes principales de brèche soit, par ordre d'importance, la lithologie, le réseau hydrographique et la capacité de rétention des banquettes. En ce qui concerne la lithologie, 75 % des banquettes installées sur les argiles gypseuses sont affectées par au moins une brèche alors que seulement 30 % des banquettes sur les marnes sont affectées et 18 % des banquettes sur les formations marno-calcaires. On observe que 80 % des brèches sont localisées sur le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued d'El Gouazine. Dans la partie aménagée aval du bassin versant, sur les argiles gypseuses, une banquette sur deux recoupant le réseau hydrographique est affectée par une brèche alors que ce rapport est d'une banquette sur douze sur les marnes et les marno-calcaires.

Le calcul du rapport entre le volume ruisselé décennal sur l'impluvium d'une banquette et la capacité initiale de rétention de son canal amont permet de constater que 40 % des banquettes ont une capacité de rétention inférieure au volume ruisselé décennal sur leur impluvium et 45 % des brèches sont situées au niveau de ces banquettes. En outre, la plupart des surdimensionnements sont effectués au sommet des versants, ce qui entraîne la brèche de banquettes en cascades. Pour engager des actions de réhabilitation des aménagements en banquettes et pour établir une politique de développement durable à l'échelle du bassin versant, il semble maintenant nécessaire de mieux protéger les zones

vulnérables à l'érosion en évitant d'aménager en banquettes les zones de forte instabilité, en limitant leur extension afin de maintenir un certain équilibre dans la répartition des eaux de ruissellement entre l'amont et l'aval du bassin versant.

Mots-clés : brèche des banquettes, SIG, ortho-images, bassin versant, zone semi-aride, Tunisie.

IDENTIFICATION OF THE CAUSES OF ANTI-EROSION BENCH BREAKAGES IN A SEMI-ARID REGION OF TUNISIA USING AERIAL ORTHO-IMAGES AND MULTISOURCE DATA INTEGRATED INTO A GIS

Abstract

In the Tunisian semi arid zone, a million hectares were equipped with anti-erosive contour benches. A contour bench can be defined as a ground lifting of reduced and constant width, with a very wide ditch. It is installed on slopes and two contour benches delimit a crop area, which is used as impluvium to the contour bench downstream. Characterizing the causes of anti-erosion bench breakages is designed to promote a more sustainable management of water and soil in the catchment area. A study was carried out on the small catchment area of El Gouazine in central Tunisia to determine the main causes of breakage of anti-erosion benches using aerial orthophotos from 2001, thematic maps (lithology, land cover, topography) and on-site observations. These data were then integrated into a GIS. With the SPOT-4 HRV(XS) satellite image, with a ground resolution of 20 m, it was not possible to detect the bench installations between 4 and 6 m in width. During a measurement campaign carried out in August 2005 in the Oued El Gouazine catchment area, a GPS was used permitting the identification of 109 breaks on a total of 439 benches constructed during 1996 and 1997, signifying that one out of every four benches was damaged after eight years. The analysis of the causes of the earth bank breakages showed three main causes. These are, in order of importance: lithology, the hydrographic network and the retention capacity of the benches. As to the lithology, 75 % of the earth benches installed on gypsum clay were affected by at least one breach whereas 30 % of earth benches on marls were affected and 18 % were on marl-limestone formations. In the Oued El Gouazine catchment area, 80 % of the breaches observed were located on the hydrographic network. In the downstream portion of the catchment area, on gypsum clays, one out of two benches intersecting the hydrographic network is affected by a breach while one bench out of every twelve is affected on marls and marl-limestones.

The calculation of the relationship between the decennial runoff volume on the impluvium and the initial retention capacity of the earth benches showed that 40 % of the benches had retention capacities inferior to the decennial runoff volumes on their impluvium, and that 45 % of the breaches were located on these benches. Moreover, most of these were at the top of slopes, leading to a series of bench breakages below them. To insure the restoration of the earth bench installations and to define sustainable development policies for the catchment area, it seems necessary at present to better protect areas vulnerable to erosion by avoiding bench installations in highly unstable areas by limiting their expansion in order to maintain a certain balance in the distribution of runoff water between the upstream and downstream portions of the catchment area.

Key words: contour benches, GIS, ortho-images, hill reservoir, semi-arid areas, Tunisia.

1. INTRODUCTION

Au cours des trois dernières décennies, en milieu semi-aride tunisien, des banquettes anti-érosives en terre ont été construites sur environ un million d'hectares de terres agricoles (DG/ACTA, 2003). Ces aménagements permettent la lutte contre l'érosion hydrique des terres et favorisent l'infiltration des eaux de ruissellement sur les versants aménagés. Cependant, l'efficacité de ces aménagements reste mal connue, ainsi que leur conformité relative au milieu biophysique et au fonctionnement hydrologique.

Les ortho-images aériennes se sont révélées un outil efficace pour l'identification des paramètres physiques et biologiques des bassins versants (Baccari *et al*., 2005) : occupation des terres, réseau hydrographique, formations rocheuses et formations meubles, aménagements de conservation des eaux et du sol. Nous allons les utiliser dans cet article pour l'étude de l'efficacité des aménagements en banquettes de terre.

Faute d'images HRG de SPOT-5 de haute résolution spatiale (2,5 m), trop coûteuses, nous utiliserons les images HRV(XS) de SPOT-4 (résolution de 20 m) afin de tester leur utilisation pour l'identification des aménagements anti-érosifs.

L'objectif de cet article est d'évaluer l'apport des ortho-images aériennes et d'un système d'information géographique (SIG) à l'identification des causes de brèche des banquettes en terre en zone semi-aride tunisienne.

2. SITE D'ÉTUDE

Le bassin versant de l'oued d'El Gouazine, qui couvre une superficie de 18,1 km², est localisé en Tunisie centrale semi-aride (figure 1). Il se situe 12 km à l'est d'Oueslatia, entre les djbels Es Serj au nord-ouest et Er Rihana au sud-est. Sa pluviométrie annuelle moyenne est de 350 mm. L'altitude du bassin est comprise entre 575 m au sud et 375 m au nord, à son exutoire. Un petit barrage a été construit en 1993 à cet exutoire. La pente longitudinale du bassin est de 1,8 %. Du point de vue topographique, 28 % de la superficie du bassin présente une pente faible, inférieure à 5 % et 60 % de la superficie du bassin présente une pente comprise entre 5 % et 35 % (Baccari *et al*., 2006). Rappelons ici que 5 % et 35 % constituent les limites inférieure et supérieure d'un aménagement anti-érosif en banquettes (Bahri *et al*., 1995).

Du point de vue lithologique, 34 % de la superficie du bassin est recouverte par une alternance de marnes et de calcaires, 45 % par une formation marneuse, 2 % est occupée par les argiles gypseuses, 7 % par les calcaires, 9 % par des alluvions sableuses et graveleuses de l'oued d'El Gouazine et le dernier 3 % est occupé par du grès consolidé (Baccari *et al*., 2007). Entre juin 1996 et juillet 1997, des aménagements en banquettes de terre à rétention totale ont été réalisés sur la partie cultivée du bassin versant qui couvre une superficie de 783 ha, soit environ 43 % de la superficie totale du bassin.

Les banquettes en terre réalisées sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine sont des levées de terre construites parallèlement aux courbes de niveau (figures 2 et 3). Chaque élément de banquette est édifié perpendiculairement à la pente du terrain, avec un remblai de terre de forme trapézoïdale et un fossé évasé formant un canal dans sa partie amont (figure 4). La banquette a pour but d'intercepter les eaux de ruissellement et d'empêcher leur concentration (Heusch, 1986). Ces aménagements sont à rétention totale, leurs canaux amont (fossés creusés en amont des banquettes au cours de leur construction) étant fermés à leurs extrémités. Ils sont généralement dimensionnés pour retenir le ruissellement maximal ayant une période de retour de 10 ans. Les banquettes ayant été réalisées depuis neuf ans, leurs canaux de retenue ont été comblés par des sédiments ou leurs talus ont été entaillés par des brèches.

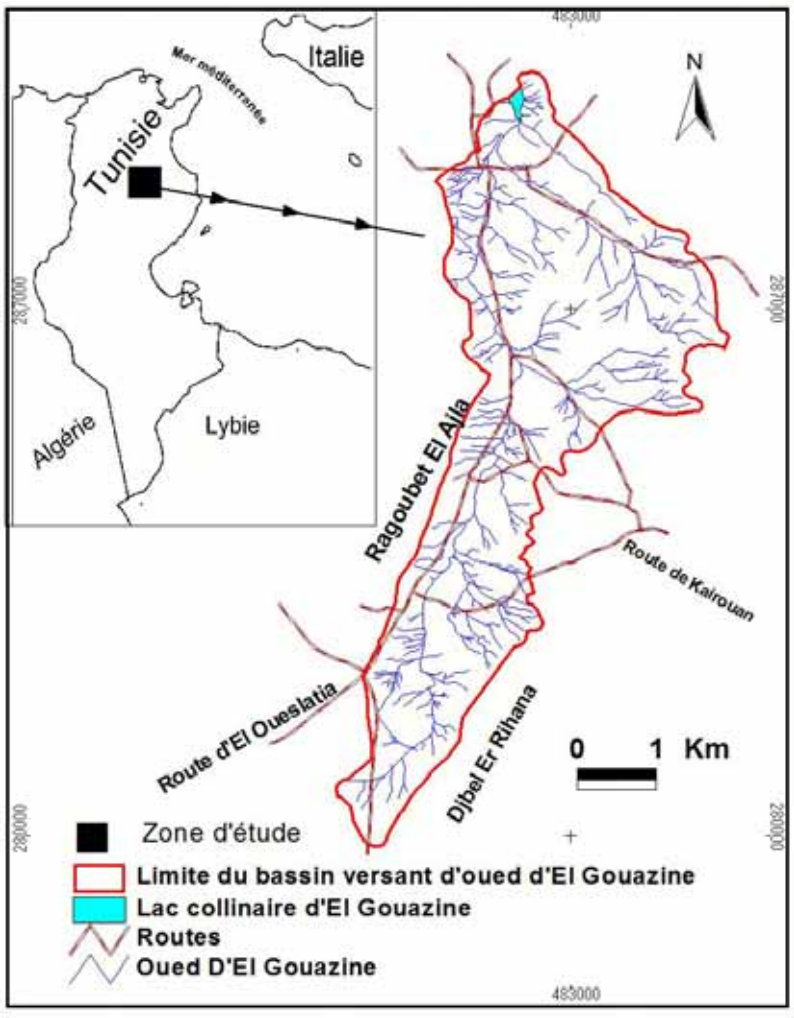


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude. *Location map of the El Gouazine catchment area.*

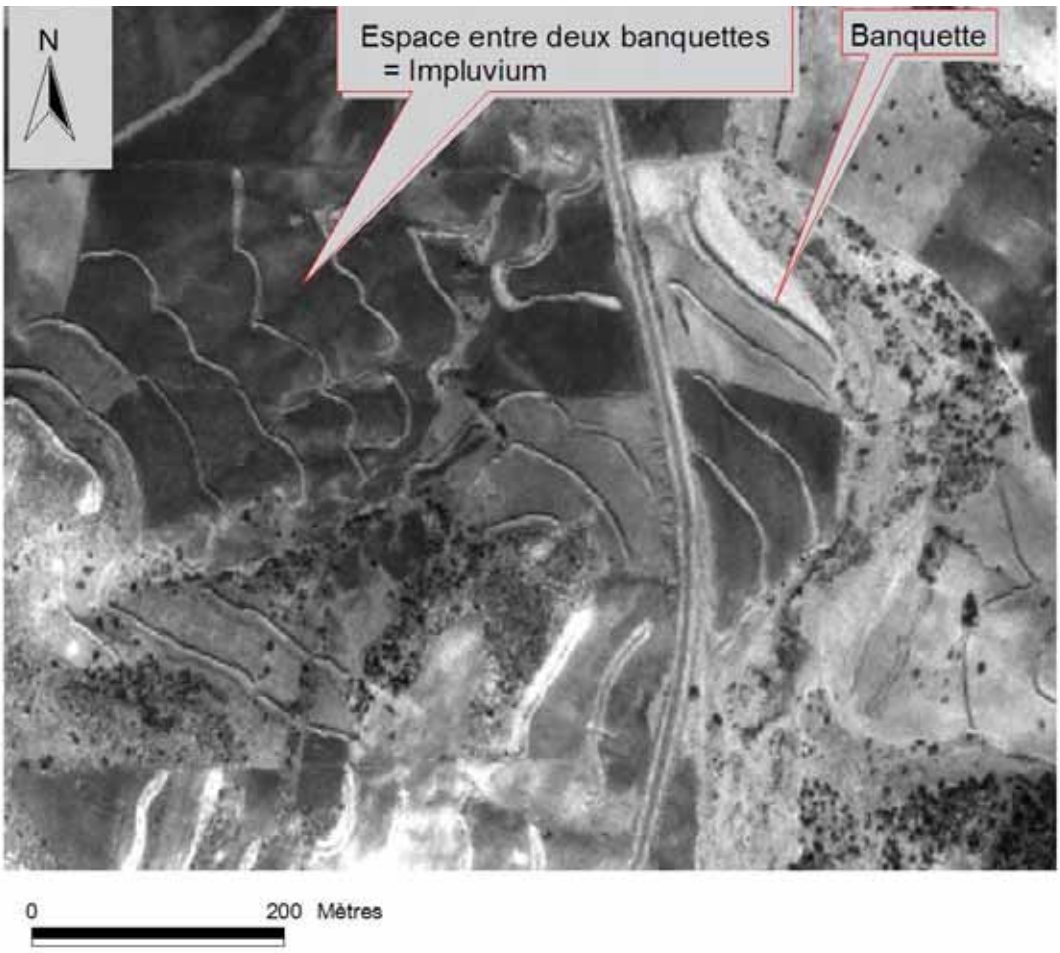


Figure 2 : Vue des banquettes en terre extraite d'une ortho-image prise sur la partie aval du bassin versant de l'oued d'El Gouazine. *View of the contour benches extracted from an ortho-image taken on the downstream portion of the El Gouazine catchment area.*

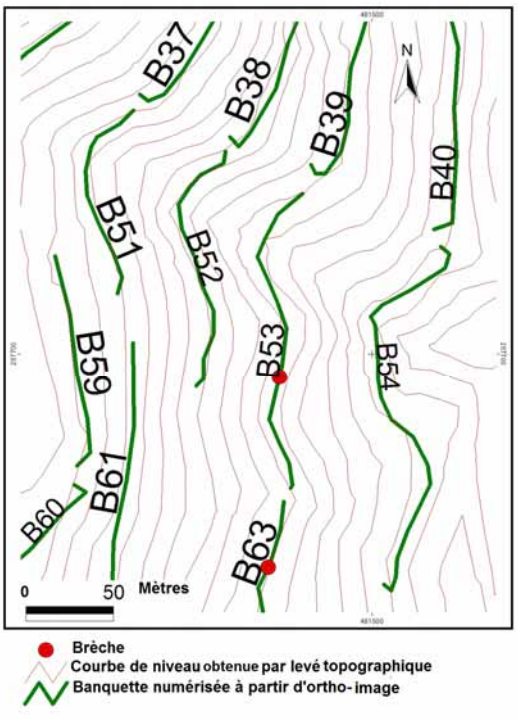


Figure 3 : Alignement des banquettes par rapport aux courbes de niveau. *Alignment of anti-erosion benches with relation to the contour lines.*

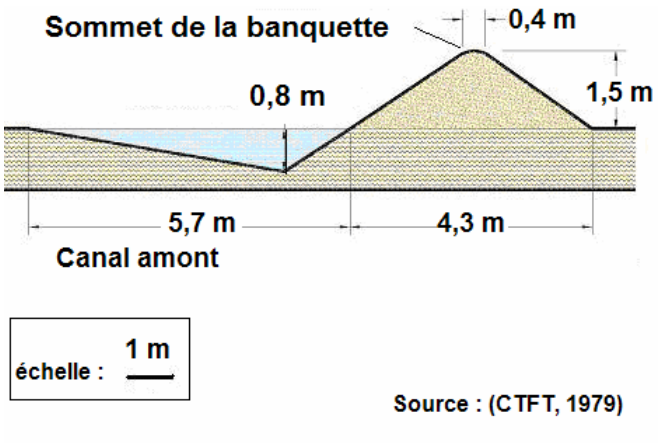


Figure 4 : Section transversale d'une banquette. *Transversal section of a contour bench.*

3. MATÉRIEL ET MÉTHODE

Nous avons utilisé deux types d'images : des images satellitaires de résolution spatiale de 20 m au sol, c'est-à-dire une image HRV(XS) de SPOT-4 acquise le 16 avril 2000 (figure 5) et des ortho-images aériennes (figure 2). Sur le tableau 1, on illustre les principales caractéristiques des images utilisées.

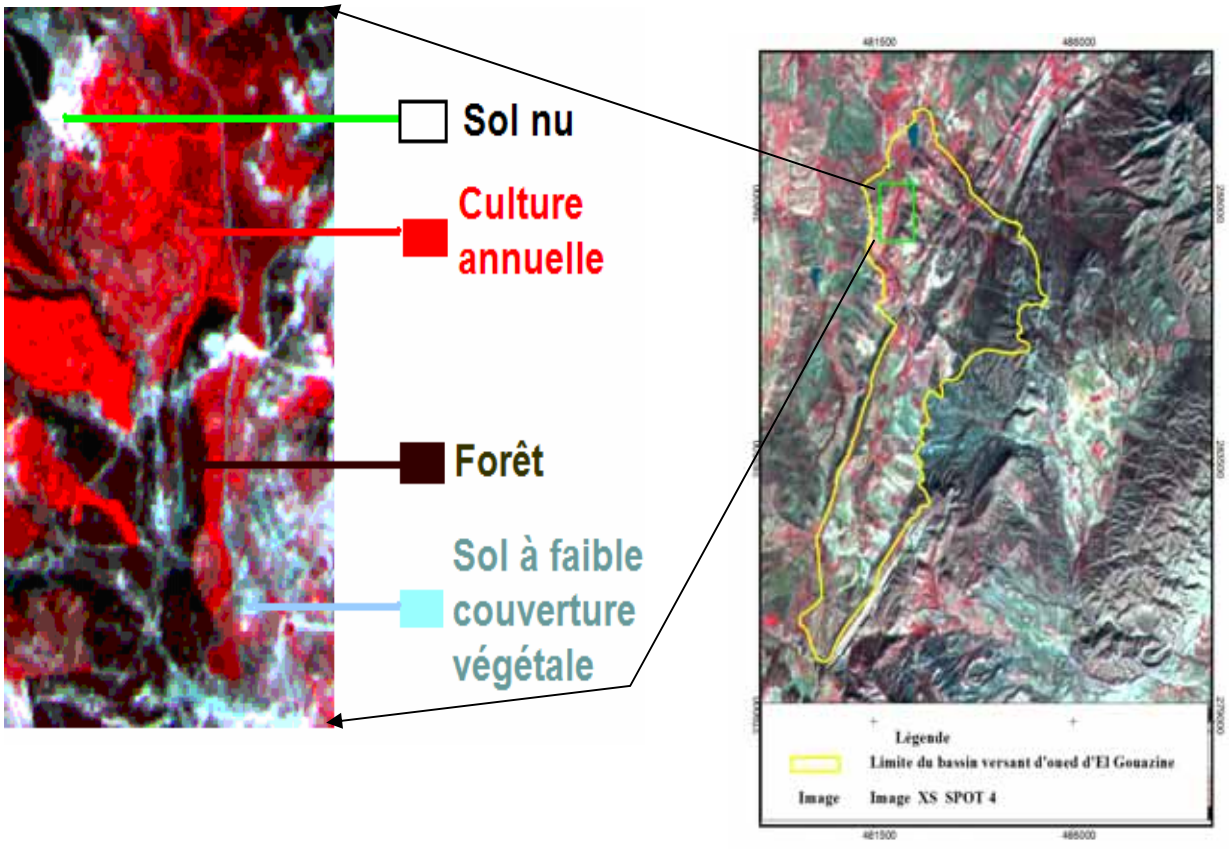


Figure 5 : Image composite des bandes XS1, XS3 et XS4 de HRV de SPOT du bassin versant de l'oued d'El Gouazine, le 16 avril 2000. *Composite image of bands XS1, XS3 and XS4 of the El Gouazine catchment area on April 16, 2000.*

Tableau 1 : Caractéristiques des images utilisées. *Characteristics of the images used.*

Type d'image	Résolution spatiale (m)	Nombre de bandes	Date d'acquisition
HRV(XS) de SPOT-4	20	4	16-04-2000
Ortho-images aériennes	2	1 : 10 000	14-06-2001

Le traitement radiométrique a été réalisé à l'aide du logiciel ERDAS-Imagine pour améliorer le contraste et la netteté des images afin de pouvoir distinguer et visualiser les aménagements de conservation des eaux et du sol. Le rehaussement des images consiste à modifier l'aspect visuel des images pour faciliter la détection de certains détails comme les éléments de banquettes de terre. Dans ce travail, nous avons appliqué la méthode du rehaussement linéaire du contraste et créé une composition colorée.

L'image XS et les huit images aériennes ont subi une rectification tridimensionnelle en introduisant, pour chaque image, les paramètres suivants :

- le système de projection Lambert conique conforme ;

- huit points d'appui pour l'image RRV et six points par image aérienne, facilement repérés sur les images et dont les coordonnées sont parfaitement connues sur la carte topographique correspondante ;

- un modèle numérique d'altitude (MNA) (± 0,7 m), numérisé à partir de la carte topographique à l'échelle 1 : 50 000 à l'aide du logiciel Arc/Info ; ce MNA a servi aussi à l'élaboration de la carte des pentes.

Les images provenant de cette orthorectification sont des ortho-images présentant une uniformité géométrique parfaite, avec une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 0,8 m. L'assemblage des ortho-images aériennes, au moyen du logiciel ERDAS-Imagine, permet d'obtenir une orthomosaïque où il est difficile de discerner les limites des images originales (Baccari *et al.,* 2005). Cette orthomosaïque est donc prête à être intégrée dans un SIG pour en extraire les différentes informations qu'elle contient. Cette orthomosaïque a servi à la numérisation des banquettes et de leurs impluviums, à la cartographie de l'occupation des terres et à la numérisation du réseau hydrographique.

Pour analyser le disfonctionnement des banquettes en terre du bassin versant de l'oued d'El Gouazine, on a d'abord procédé à la cartographie de ces aménagements à partir d'images aériennes produites par la direction des forêts et l'Office de la topographie et de la cartographie (OTC) au cours de l'année 2001. Ces images aériennes ont une résolution au sol de 2 m (taille du pixel) et elles permettent de détecter facilement les aménagements en banquettes antiérosives (figure 2). Les photographies aériennes de départ avaient une échelle de 1 : 10 000. La carte du bassin versant est constituée de huit images assemblées en une mosaïque géopositionnée à l'aide du logiciel ERDAS-Imagine.

Pour établir la carte lithologique du bassin versant, on a combiné les données de la carte géologique (Jauzein, 1959) avec celles de levés lithologiques sur le terrain et de l'interprétation des ortho-images aériennes.

Les relevés sur le terrain, réalisées en 2005, ont permis de localiser avec une précision de ± 1 m, au GPS, les extrémités des banquettes, leur ensellement, le comblement des canaux (fossés) amont par des sédiments et leurs brèches.

Une banque de données, contenant toutes les caractéristiques biophysiques relatives au bassin versant de l'oued d'El Gouazine et à ses aménagements en banquettes anti-érosives, a été créée à l'aide du logiciel Arcview GIS.

Pour identifier les risques de brèche des banquettes, nous avons défini trois groupes d'indicateurs qui constituent les principaux facteurs d'instabilité des banquettes en terre :

- deux indicateurs sont relatifs au milieu biophysique : la pente du terrain et la lithologie ;

- deux indicateurs sont relatifs à la construction des banquettes : leur alignement sur les courbes de niveau et leur intersection avec le réseau hydrographique ;

- un indicateur est relatif à la capacité de rétention de la banquette : le rapport du volume ruisselé décennal sur l'impluvium et de la capacité initiale de rétention de la banquette.

Pour analyser le rôle de la pente, nous avons utilisé le MNA afin d'élaborer une carte des pentes du bassin versant. Les pentes ont été regroupées en cinq classes : pentes très faibles (0 à 5 %), pentes faibles (5 à 10 %), pentes moyennes (10 à 15 %), pentes fortes (15 à 25 %) et pentes très fortes (> 25 %). Nous avons ensuite fait l'inventaire des banquettes et de leurs brèches pour chaque classe de pente afin d'analyser le rôle de la pente sur la brèche de banquettes. Rappelons ici qu'en Tunisie les banquettes sont construites suivant les normes de pente préconisées par la FAO (Food and Agriculture Organisation), soit pour des pentes comprises entre 5 % et 25 % (Bahri *et al*., 1995).

En ce qui concerne le rôle de la lithologie, nous avons inventorié les banquettes et leurs brèches sur chaque formation lithologique du bassin versant. Selon les normes FAO (Bahri *et al*., 1995), la construction des banquettes est prohibée sur les formations calcaires à faible recouvrement pédologique (épaisseur du sol inférieure à 15 cm) et sur les formations argileuses en raison de l'instabilité des talus.

Pour étudier l'alignement des aménagements en banquettes par rapport aux courbes de niveau, nous avons superposé la carte des aménagements en banquettes, réalisée à partir des ortho-images aériennes, et les courbes de niveau numérisées à partir de la carte topographique à l'échelle du 1 : 50 000 avec une équidistance de 10 m. Nous avons également réalisé un MNA extrait d'un nivellement topographique précis (un point tous les 5 m) d'un versant et de ses aménagements en banquettes sur une superficie de 12 ha.

En ce qui concerne le réseau hydrographique, nous avons réalisé l'inventaire des banquettes recoupant le réseau hydrographique et des brèches localisées sur ce réseau ou à proximité, c'est-à-dire sur une distance de 5 m de part et d'autre des thalwegs.

Pour calculer le volume ruisselé décennal sur les impluviums des banquettes, nous avons déterminé les superficies des impluviums en numérisant chaque impluvium à l'aide du SIG, à partir de l'orthomosaïque, et en lui attribuant un coefficient de ruissellement décennal en fonction de type de sol et de l'occupation des terres (cultures céréalières ou jachères). L'occupation des terres a été extraite par traitement de l'image HRV. Le volume ruisselé décennal d'un impluvium est calculé en multipliant la hauteur pluviométrique journalière décennale par le coefficient de ruissellement correspondant et par la superficie de l'impluvium.

Pour le calcul de la capacité de rétention des canaux amont, nous avons multiplié la longueur de la banquette par la section moyenne de son canal amont, estimée à 2 m² par nivellement topographique d'un échantillon de 14 banquettes localisées dans la partie aval du bassin versant de l'oued d'El Gouazine.

4. RÉSULTATS

Nous allons maintenant présenter les résultats obtenus à partir des travaux effectués sur le terrain, des travaux liés à l'analyse des ortho-images aériennes ainsi que de l'image HRV. Ces résultats concernent la cartographie des banquettes ainsi que les rôles de la pente, de la lithologie, du réseau hydrographique, de la topographie et de l'occupation des terres dans la formation des brèches et le disfonctionnement des banquettes.

4.1. Utilisation des images satellitaires

Avec l'image HRV, qui n'a une résolution au sol que de 20 m, il n'a pas été possible de détecter les banquettes caractérisées par des digues dont la largeur est de l'ordre de 4 à 6 m. Par contre, nous avons pu cartographier l'occupation des terres et le couvert végétal à l'aide de l'indice de végétation, en particulier les zones cultivées et les forêts (figure 5). Les zones cultivées sont susceptibles d'être aménagées en banquettes alors que les forêts correspondent à des reboisements de pins d'Alep.

4.2. Rôle de la pente

Les travaux de terrain effectués pendant l'été 2005 ont permis de constater qu'il y avait 109 brèches sur les 439 banquettes réalisées en 1996 et 1997 sur le bassin versant de l'oued d'EL Gouazine (tableau 2). Le taux de brèche moyen des ouvrages est donc de 25 % après huit à neuf années de fonctionnement. On constate aussi que 70 % des banquettes sont construites sur une pente très faible, inférieure à 5 %, et que seules les banquettes installées sur les pentes très fortes présentent un taux de brèche nettement plus élevé (57 %).

Tableau 2 : Répartition des banquettes de terre par rapport à la pente sur la partie cultivée du bassin versant de l'oued d'El Gouazine. *Distribution of contour bench installations according to slope class over cultivated area in the El Gouazine catchment.*

Classes de pentes	Nombre de banquettes	% des banquettes	Nombre de brèches	% du nombre de brèches/nombre de banquettes
Très faible	308	70	70	22
Faible	29	7	10	34
Moyenne	57	13	14	24
Forte	38	9	11	28
Très forte	07	1	4	57
Total	439	100	109	25

4.3. Rôle de la lithologie

La superposition de la carte des disfonctionnements des aménagements en banquettes relevés sur le terrain et de la carte lithologique (figures 6 et 7) a permis de constater que :

- 22 brèches affectent les 16 banquettes installées sur les formations argilo-gypseuses, soit un taux de brèche de 137 % ;

- 12 brèches affectent les 40 banquettes installées sur les formations marneuses brunes à intercalations de calcaires lumachelliques, soit un taux de brèche de 30 % ;

- 67 brèches affectent les 364 banquettes installées sur les formations de marnes marron foncé, soit un taux de brèche de 18 % ;

- 6 brèches affectent les 12 banquettes installées sur les formations marneuses grises à intercalations calcaires, occupant les sommets et les lignes de crête du bassin versant, soit un taux de brèche de 50 % ;

- 2 brèches affectent les 7 banquettes installées sur les formations gréseuses, soit un taux de brèche de 28 %.

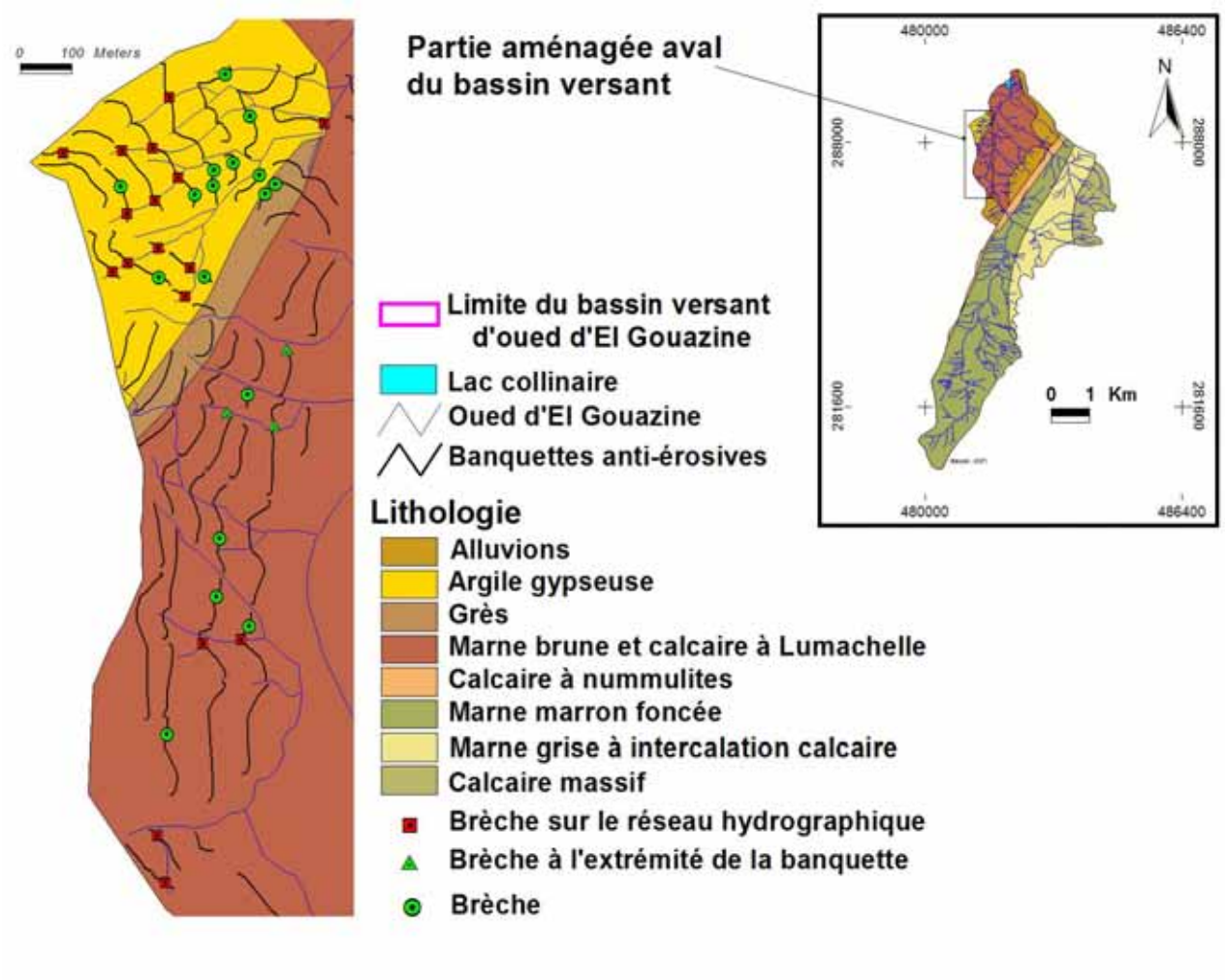


Figure 6 : Localisation des brèches par rapport au réseau hydrographique et à la lithologie dans la partie aval du bassin versant de l'oued d'El Gouazine. *Localization of breaches in relation to the lithology and the hydrographic network in the downstream portion of the El Gouazine catchment.*

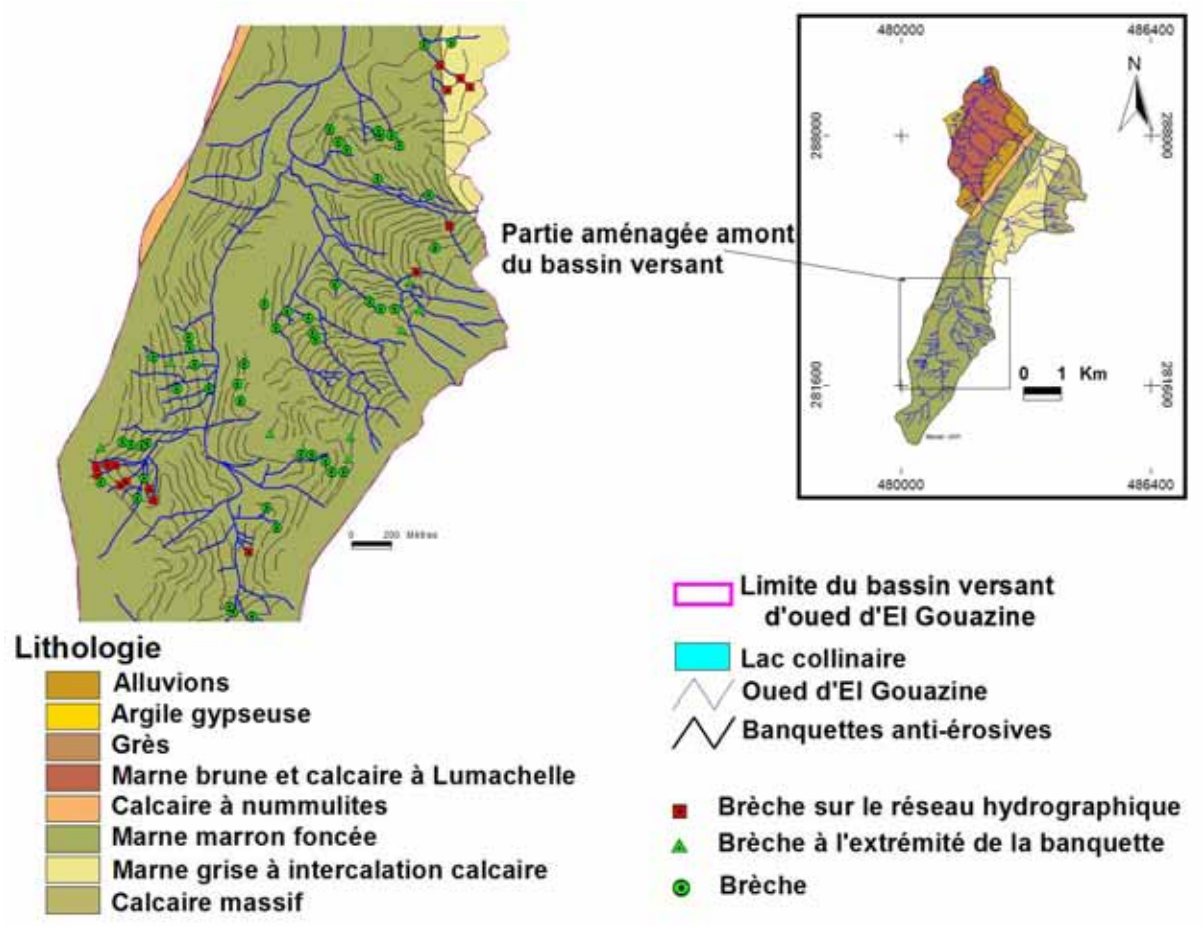


Figure 7: Localisation des brèches par rapport au réseau hydrographique et à la lithologie dans la partie amont du bassin versant de l'oued d'El Gouazine. *Localization of breaches in relation to the lithology and the hydrographic network in the upstream portion of the El Gouazine catchment.*

4.4. Rôle du réseau hydrographique

Le croisement de la carte des disfonctionnements des aménagements en banquettes relevés sur le terrain avec celle du réseau hydrographique (provenant de la carte topographique), permet de constater que 80 % des brèches observées sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine sont associées au tracé du réseau hydrographique (figures 6 et 7), soit 33 % sur d'anciens cours d'eau ou des thalwegs, 47 % à proximité du réseau. Les autres brèches (20 %) sont localisées aux extrémités des banquettes.

Dans la partie aval aménagée du bassin versant et sur les argiles gypseuses, on dénombre 37 banquettes recoupant le réseau hydrographique, dont 17 sont directement associées à des brèches au niveau des banquettes, soit un risque de brèche de 46 %. Dans la partie amont aménagée du bassin versant, sur les marnes, on dénombre 203 banquettes recoupant le réseau hydrographique, dont 17 sont associées directement à des brèches de banquettes et 23 sont situées à proximité du réseau, soit un risque de brèche de 20 %.

4.5. Rôle de l'alignement des banquettes sur les courbes de niveau

La comparaison entre les courbes de niveau obtenues par nivellement et celles obtenues à partir de la numérisation de la carte topographique au 1 : 50 000 du Djbel Serj, montre que la précision de la carte topographique au 1 : 50 000 est très insuffisante (± 5 m) pour analyser l'impact de l'alignement des banquettes par rapport aux courbes de niveau. Il a donc fallu créer un modèle numérique du terrain (MNT) à partir des nivellements topographiques pour réaliser cette analyse.

La superposition de la carte des aménagements en banquettes, réalisée à partir des ortho-images aériennes de l'année 2001, et du MNT, réalisé sur le versant de 12 ha, montre que 78 % des banquettes sont alignées parallèlement aux courbes de niveau (figure 3).

Trois banquettes ne suivent pas les courbes de niveau (B53, B54 et B60), mais une seule de ces trois banquettes (B53) présente une brèche. L'écart observé entre les courbes de niveau de référence et les points bas des banquettes est compris entre 2 et 3 m (figure 3). La banquette B63, qui suit sa courbe de niveau, est également affectée par une brèche.

4.6. Rôle de la capacité de retenue des banquettes

La pluie journalière de fréquence décennale dans la région de Oueslatia, à 12 km de l'oued d'El Gouazine, a été estimée à 94 mm (Albergel et Rejeb, 1997). Compte tenu des observations hydrologiques effectuées par Al Ali *et al.* (2006) sur deux impluviums sur un sol limono-sableux et substratum marneux du bassin versant de l'oued d'El Gouazine, l'un cultivé et l'autre sur une jachère à faible couvert végétal, les coefficients de ruissellement décennaux peuvent être estimés à 28 % pour l'impluvium cultivé et à 57 % pour la jachère. Sur un sol argileux et un substratum rocheux d'argiles gypseuses, les travaux réalisés sur le bassin versant de Fidh Ali (Collinet et Zante, 2005) montrent que le coefficient de ruissellement maximal des parcelles cultivées sur des sols bruns calcaires vertiques à substratum rocheux marno-gypseux varie de 59 % à 66 %.

Le calcul du rapport du volume ruisselé décennal sur les impluviums à la capacité de rétention des banquettes nous a permis de distinguer cinq classes pour les impluviums cultivés sur les marnes (tableau 3) et deux classes pour les impluviums cultivés sur les argiles gypseuses (tableau 4).

Sur les marnes (tableau 3), on constate qu'il n'y a pas de relation directe entre la brèche d'une banquette et la dimension de son impluvium amont car le pourcentage des brèches est sensiblement le même (20 à 30 %), qu'elle que soit la dimension de l'impluvium. Cependant, si en examine la localisation des brèches sur les versants (figure 7), on remarque que ces dernières sont de plus en plus fréquentes en aval, à partir du deuxième ou du troisième niveau dans la cascade des banquettes.

Sur les argiles gypseuses (tableau 4), on constate que 81 % des banquettes ayant une capacité de rétention inférieure au volume ruisselé décennal sur leur impluvium sont affectées par des brèches. Pour les banquettes dont la capacité de retenue est supérieure au volume ruisselé sur leur impluvium, 19 % d'entre elles sont tout de même affectées par des brèches. Cette valeur est légèrement inférieure au pourcentage moyen de brèche des banquettes sur l'ensemble du bassin versant qui est de 25 %.

Tableau 3 : Disfonctionnement des banquettes et capacité de rétention des banquettes sur marnes. *The relationship between holding capacity of contour ridges installed over marls and their dysfunction.*

Indice de fonctionnement hydrologique	Nombre de banquettes avec brèche	Nombre de brèches	Nombre de banquettes sans brèche	Nombre total de banquettes	% de brèches
$Vr/C_{initiale} > 7$	0	0	3	3	0
$3< Vr/C_{initiale} < 7$	3	6	24	27	22
$2 < Vr/C_{initiale} < 3$	9	10	24	33	30
$1< Vr/C_{initiale} < 2$	20	22	77	97	23
$Vr/C_{initiale} < 1$	46	55	205	251	21
Total	78	93	333	411	22

Vr : volume ruisselé décennal sur l'impluvium cultivé de la banquette. $C_{initiale}$: capacité initiale de stockage du canal amont de la banquette.

Tableau 4 : Disfonctionnement des banquettes et capacité de rétention des banquettes sur argiles gypseuses. *The relationship between holding capacity of contour ridges installed over gypsum clays and their dysfunction.*

Indice de fonctionnement hydrologique	Nombre de banquettes avec brèche	Nombre de brèches	Nombre de banquettes sans brèche	Nombre total de banquettes	% des banquettes affectées par des brèches	% de brèches
$1< Vr/C_{initiale} < 2$	11	20	2	13	81	154
$Vr/C_{initiale}< 1$	2	2	1	3	19	67
Total	13	22	3	16	100	137

Vr : volume ruisselé décennal sur l'impluvium cultivé de la banquette. $C_{initiale}$: capacité initiale de stockage du canal amont de la banquette.

5. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

À partir des résultats présentés dans la section précédente, nous allons maintenant les interpréter et les discuter de manière à caractériser les principales causes de disfonctionnement des banquettes tout en évaluant l'apport des images satellitaires, des orthoimages et d'un SIG à la caractérisation du risque de brèche des banquettes.

5.1. Utilisation des images satellitaires

Il n'a pas été possible de détecter les aménagements en banquettes avec les images HRV d'une résolution de 20 m. Compte tenu de la taille des banquettes, dont la largeur ne dépasse pas 6 m, il semble nécessaire d'utiliser des images à haute résolution (taille du pixel inférieure ou égale à 5 m). Une bonne distinction entre aménagements en banquettes et les champs cultivés doit être possible lorsque les champs ont été labourés après les pluies d'automne, car ces pluies favorisent le développement de la végétation herbeuse sur les banquettes. Une bonne distinction des aménagements en banquettes est également possible par télédétection au début du printemps, lorsque les pluies hivernales ont permis le développement de la végétation naturelle sur les banquettes, la végétation cultivée ayant toujours un retard de croissance par rapport à la végétation naturelle. Cette différence de vitesse de croissance entre la végétation herbeuse naturelle et la végétation cultivée peut également être exploitée pour distinguer les jachères des cultures à partir d'images HRV(XS). Les observations hydrologiques sur parcelles (Al Ali *et al.*, 2006) ont en effet montré que le ruissellement décennal pouvait être deux fois plus important sur une parcelle en jachère que sur une parcelle cultivée. La mise en jachère d'une parcelle cultivée pourrait donc expliquer la rupture de sa banquette aval si cette mise en jachère coïncide avec un évènement pluviométrique exceptionnellement fort.

5.2. Rôle de la pente

Il semble difficile de justifier l'existence de banquettes sur les pentes très faibles, inférieures à 5 %, sauf si le concepteur de l'aménagement de CES du bassin versant de l'oued d'El Gouazine a privilégié la rétention des eaux de ruissellement sur les versants en favorisant son infiltration. Cet objectif est cependant en contradiction avec l'existence d'un lac collinaire à l'exutoire du bassin, lac dont la vocation est la retenue des eaux de ruissellement pour la micro-irrigation. En ce qui concerne les autres classes de pente, le pourcentage de banquettes affectées par des brèches est de 24 % pour une pente moyenne, de 28 % pour une pente forte et de 34 % pour une pente faible. On peut donc considérer que, sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine, la pente ne constitue pas, à elle seule, une cause de disfonctionnement des banquettes, car les banquettes sur pentes faibles sont nettement plus affectées par des brèches (34 % des banquettes) que les banquettes sur pentes moyennes (24 %) ou fortes (28 %). Par contre, plus d'une banquette sur deux est affectée par une brèche sur les pentes très fortes. Conformément aux directives de la FAO (Bahri *et al*., 1995), cette dernière classe de pente ne devrait donc pas faire l'objet d'un aménagement en banquettes et notre étude confirme le bien-fondé de cette directive.

5.3. Rôle de la lithologie

La formation argilo-gypseuse pose de sérieux problèmes de stabilité des banquettes car toutes les banquettes installées sur cette formation rocheuse présentent au moins une brèche. Des analyses minéralogiques au rayon X (Baccari *et al*., 2007) ont confirmé l'existence d'argiles smectitiques dans les échantillons prélevés dans cette formation. Les smectites sont des argiles qui ont la propriété d'accroître considérablement leur volume en cours d'humectation. À l'inverse, le dessèchement provoque l'apparition de fentes de retrait, créant une macroporosité qui facilite la circulation des eaux à l'intérieur des digues en terre. Par leur susceptibilité au gonflement et au retrait, ces argiles sont donc à l'origine de la brèche des banquettes. Leur plus grande importance dans la composition des argiles gypseuses que dans les autres formations, confère à ces argiles une forte inaptitude à l'aménagement en banquettes. Cette inaptitude est renforcée par la présence de gypse qui, par dissolution, provoque la création de chenaux à l'intérieur des banquettes par le phénomène de suffosion (*piping*).

Outre la formation lithologique argilo-gypseuse, il semble également que les banquettes implantées en haut de versant, sur les formations marneuses grises à intercalations de calcaires, soient sujettes à des brèches. Mais ces dernières sont dues, comme on le verra ultérieurement, à la capacité de retenue de ces banquettes, nettement inférieure au volume ruisselé sur leur impluvium au cours des fortes pluies.

5.4. Rôle du réseau hydrographique

Le point d'intersection d'une banquette et du réseau hydrographique constitue le plus souvent le niveau topographique le plus bas du canal amont, ce qui favorise la rétention des eaux en ce point et leur débordement au-dessus du talus pendant les fortes averses. Sur les terrains argilo-gypseux et marneux, les eaux des premières pluies d'automne circulent entre les fentes de retrait qui existent dans le talus de la banquette au niveau du canal amont. La circulation de l'eau dans les fissures dissout le gypse, provoquant ainsi la disparition d'une partie des constituants du sol et créant des tunnels par suffosion. Le passage répétitif des eaux au niveau de ces tunnels finit par rompre la banquette. Les eaux collectées dans le canal amont de la banquette se concentrent au niveau des brèches, créant de nouveaux ravins ou réactivant d'anciens ravins en les agrandissant. Le croisement des banquettes et du réseau hydrographique semble donc

avoir un effet démultiplié sur les argiles gypseuses, dans la partie aval du bassin versant, où le risque de brèche est de 46 % contre 20 % sur les formations marneuses.

5.5. Rôle de l'alignement des banquettes sur les courbes de niveau

Les levés topographiques effectués sur les canaux amont de 14 banquettes dans la partie aval du bassin versant de l'oued d'El Gouazine montrent qu'elles présentent des hauts fonds et des bas fonds, les premiers correspondant à des zones d'atterrissement préférentiel des sédiments et les seconds à des zones de stagnation des eaux de ruissellement. La banquette B53 (figure 3) a été sujette à des débordements au niveau le plus bas de la digue et celle-ci a fini par se rompre.

Ainsi, dans le cas où une banquette ne suit pas la courbe de niveau, il se forme dans le canal amont des points d'accumulation des apports liquides et solides qui constituent alors des zones de faiblesse de la banquette, lieux préférentiels pour d'éventuelles brèches. Après une forte pluie, lorsque le canal amont présente une pente longitudinale, les eaux de ruissellement qui arrivent au niveau du canal vont s'écouler latéralement vers l'une des extrémités de la banquette ou vers les deux extrémités à la fois. Ces écoulements latéraux sont à l'origine de 20 % des brèches sur les banquettes du bassin versant de l'oued d'El Gouazine. Les eaux en excès empruntent vers l'aval de nouveaux chemins avant d'atteindre les banquettes aval, perturbant leur fonctionnement hydrologique et occasionnant des brèches en cascades.

5.6. Rôle de l'hydrologie

L'examen du tableau 3 montre que, sur les marnes, il n'y a pas de relation directe entre la brèche des banquettes et la dimension des impluviums amont. Cependant, si on examine la localisation des brèches (figure 7), on remarque que ces dernières deviennent de plus en plus fréquentes en aval des versants, à partir du deuxième ou du troisième niveau dans la cascade des banquettes. En effet, l'excès du volume ruisselé sur un impluvium, lorsqu'il ne peut être retenu par la banquette amont, va passer sur l'impluvium aval et alimenter en eau excédentaire le canal de la banquette aval. De ce fait, un surdimensionnement de l'impluvium des banquettes amont peut occasionner la brèche de banquettes en aval. Il nous faut donc examiner, banquette par banquette, si les brèches observées en aval sont causées par un surdimensionnement de l'impluvium des banquettes situées plus en amont.

Une autre raison de la diminution de la capacité de rétention des canaux amont des banquettes est l'érosion des sols cultivés. D'après Collinet et Zante (2005), le taux d'érosion sur les marnes et les argiles gypseuses varie entre 40 et 50 t/ha/an. Nous pouvons donc dire que, pour des impluviums d'une largeur moyenne de 50 m, les canaux des banquettes implantées sur argiles gypseuses perdent environ 10 % de leur capacité initiale de rétention chaque année.

6. CONCLUSION

Cette étude a permis d'établir une nouvelle méthode d'identification des risques de brèche des aménagements en banquettes de terre à l'aide des ortho-images aériennes et de données multisources intégrées dans un SIG. Faute d'une image HRG de SPOT-5 de haute résolution (2,5 m en panchromatique), seules les ortho-images aériennes à haute résolution (2 m) nous ont permis la cartographie des aménagements en banquettes sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine. Cependant, pour localiser les disfonctionnements de ces aménagements et délimiter chaque élément de banquette, il est apparu indispensable d'effectuer des levés sur le terrain à l'aide d'un GPS. Un élément de banquette est en effet défini par un segment de digue limité par deux extrémités et celles-ci sont difficiles à détecter sur des ortho-images aériennes. Les principaux disfonctionnements que nous avons pu identifier sur le terrain sont : les brèches et les fentes de retrait sur les talus, l'envasement du canal amont avec ou sans débordement, le tassement de la digue avec ou sans débordement. Ces disfonctionnements n'ont pas pu être détectés sur les ortho-images aériennes. Il devrait donc être difficile de les détecter sur les images HRG.

Pour analyser les risques de brèche des banquettes, nous avons finalement utilisé un SIG (ArcView) créé à partir :

- de la carte topographique au 1 : 50 000 pour la détermination des pentes et des longueurs de pente ;
- de la carte lithologique et des analyses granulométriques pour la détermination de l'érodibilité des sols ;
- des ortho-images aériennes pour le tracé des banquettes et du réseau hydrographique ;
- de l'image HRV pour la cartographie de l'occupation des terres et le calcul de l'indice de végétation.

Pour analyser les principales causes de disfonctionnement des banquettes, trois indicateurs ont été définis, groupés par deux, et relatifs au milieu biophysique pour le premier groupe, à la construction des banquettes pour le second, à l'hydrologie et à l'hydrographie pour le troisième. Sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine, on a pu montrer qu'il existe trois causes principales à la brèche des banquettes avec, dans l'ordre d'importance :

- l'existence d'argiles gypseuses (22 brèches sur 16 banquettes) ;
- le réseau hydrographique (33 % des brèches) ;

- l'inclinaison du canal amont vers l'une des extrémités d'une banquette (20 % des brèches) ;

- le surdimensionnement des impluviums (10 % des banquettes).

Il est à noter que la plupart des surdimensionnements sont effectués au sommet des versants, ce qui entraîne fréquemment la brèche en cascade des banquettes.

Dans le but d'améliorer l'efficience des banquettes protégeant les lacs collinaires contre l'envasement, tout en conservant une alimentation hydrique satisfaisante de ces lacs, les résultats de cette étude devraient pouvoir servir à améliorer les plans d'aménagement en banquettes de terre des bassins versants des zones semi-arides ou, éventuellement, à réhabiliter les aménagements existants. En premier lieu, il apparaît inutile d'envisager la construction de banquettes sur les formations argilo-gypseuses car leur probabilité de brèche est forte. Ces brèches sont essentiellement dues à la dissolution du gypse, qui conduit à la formation de tunnels de suffusion, et à l'existence de smectites (argiles gonflantes) qui occasionnent la formation de fentes de retrait en saison sèche dans les talus des banquettes. En second lieu, le risque de brèche des banquettes en terre apparaît nettement associé au croisement des banquettes avec le réseau hydrographique ou au surdimensionnement des impluviums au sommet des versants. En effet, plus de 80 % des brèches affectant les banquettes en terre sur le bassin versant de l'oued d'El Gouazine sont localisées sur le réseau hydrographique, ou à proximité. Dans ce cas, il est possible d'éviter l'installation des banquettes sur le réseau hydrographique en les fermant de part et d'autre des petits thalwegs. Dans l'autre cas, il paraît indispensable de dimensionner correctement l'impluvium des banquettes amont en tenant compte à la fois de leur capacité de retenue et de la capacité au ruissellement des impluviums. L'apparition d'une brèche au niveau d'une banquette peut en effet rapidement provoquer l'apparition d'une autre brèche au niveau de la banquette qui lui succède en aval. Six cascades de brèches ont ainsi été observées dans la partie amont et sept dans la partie aval totalisant 42 % de l'ensemble des brèches.

DÉDICACE

Nous dédions cet article à la mémoire de Ferdinand Bonn, qui nous a beaucoup impressionnés par ses idées scientifiques et son immense succès. Il restera toujours présent dans nos esprits par le travail qu'il a laissé. Que Dieu le tout-puissant lui accorde son infinie miséricorde et l'accueille dans son éternel paradis.

Références

Al Ali, Y., Nasri, S., Zante, P., Touma, J. et Albergel, J. (2006) Fonctionnement hydro- sédimentaire d'un aménagement de banquettes anti-érosives en courbes de niveau en zone semi-aride (El Gouazine, Tunisie Centrale). P. 164- 168, *in* Sabir, M. and Badraoui, M. (réd.) Proceeding of Water Management and Soil Convervation in Semi-arid Environments. 14e Conférence de l'International Soil Conservation Organization (ISCO), 14-19 mai, 2006, Marrakech (Maroc). Édition de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, 295 p.

Albergel, J. et Rejeb, N. (1997) Les lacs collinaire en Tunisie : enjeux, contraintes et perspectives. Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France, vol. 83, n° 2, p. 11-16.

Baccari, N., Boussema, M.R. et Snane, M.H. (2005) Nécessité de développement d'une méthodologie d'inventaire basée sur les photographies aériennes numérisées, la réalité du terrain et SIG ; cas des aménagements de conservation des eaux et du sol en Tunisie. Télédétection vol. 5, n° 1-3, p 3-18.

Baccari, N., Nasri, S. et Boussema, M.R. (2006) Efficience des banquettes sur l'érosion des terres, le remplissage et l'envasement d'un lac collinaire en semi-aride Tunisien. P. 219- 230, *in* Sabir, M. and Badraoui, M. (réd.) Proceeding of Water Management and Soil Convervation in Semi-arid Environments. 14e Conférence de l'International Soil Conservation Organization (ISCO), 14-19 mai, 2006, Marrakech (Maroc). Édition de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Rabat, 295 p.

Baccari, N., Nasri, S., Boussema, M.R. and Lamachère, J.-M. (2007) Contour ridge efficiency on land erosion, water-filling and silting up of a hill reservoir in a semi-arid region in Tunisia. P. 141-149, *in* Lamaddalena, L., Bogliotti, C., Todorovic, M., and Scardigno, A. (réd.) Proceedings of the International Conference on Water Saving in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs" (WASAMED Project). Valenzano (Italie), 14-17 février 2007, Centre international des hautes études agronomiques méditerranéennes, Bari (Italie), volume III, 351 p.

Bahri, C., Mizouri, M., Aouina, M., Khaldi, R. et Laarbi, M.M. (1995) Guide de conservation des eaux et du sol. Ministère de l'agriculture, Direction de Conservation des eaux et du sol, Projet PNUD/FAO. Tun/86/20, Tunis, 274 p.

CTFT (Centre de technique forestier tropical) (1979) Conservation des sols au sud du Sahara. 2e édition, Ministère de la coopération, République française, Paris, 295 p. et annexes.

Collinet, J. et Zante P. (2005) Analyse du ravinement de bassins versants à retenues collinaires sur sols à fortes dynamiques structurales (Tunisie). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2005, n° 1, p. 60-74.

DG/ACTA (Direction générale de l'aménagement et de la conservation des terres agricoles) (2003) Stratégie nationale de conservation des eaux et du sol (2002-2011). Ministère de l'agriculture de Tunis, Tunisie, 21 p. et annexes.

Heusch, B. (1986) Cinquante ans de banquettes de D.R.S.-C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan. Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie, vol. XXII, n° 2, p. 153-165.

Jauzein, A. (1959) Notice explicative de la carte de MAKTAR, feuille n° 53, carte géologique de la Tunisie à l'échelle 1/200 000. Office national des mines, Tunis, 14 p.