Télédétection, 2004, vol. 4, n° 1, p. 75–93
Droit de photocopie soumis à l'autorisation

© 2004 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DU RAVINEMENT EN FONCTION DE LA LITHOLOGIE DANS LES BASSINS VERSANT DES OUEDS EL HAMMAM ET RMEL EN TUNISIE CENTRALE

HAJER BOUCHNAK*[a], MENNOUBI SFAR FELFOUL,
MOHAMED RACHED BOUSSEMA[b] et MOHAMED HABIB SNANE.

Laboratoire de télédétection et système d'information à référence spatiale (LTSIERS),
École nationale d'ingénieurs de Tunis, B.P. 37,
1002 Tunis-Belvédère, Tunisie
Téléphone : 229 33 55 83 ; télécopieur : 229 3342 39/33 42 41

Courriel [(a,b)] : h_bouchnak@yahoo.fr ; Rached.Boussema@enit.rnu.tn

(soumis le 6 avril 2003 ; révisé le 10 juillet 2003 ; accepté le 27 octobre 2003)

Le déséquilibre morphologique de la région de sebkha El Kalbia trouve ses origines dans la dégradation du couvert végétal et l'utilisation irrationnelle des terres. Ce déséquilibre s'est traduit par un accroissement du taux de ruissellement et l'intensification de l'érosion hydrique, dont l'aboutissement a été la formation de badlands et la réduction de la superficie des terres cultivables. Dans la recherche effectuée, on vise à étudier l'évolution du ravinement dans les bassins versants des oueds El Hammam et Rmel, situés en Tunisie centrale, et caractérisés par un climat semi-aride. Ces bassins ont des superficies respectives de 198 ha et 1 534 ha. À cet effet, une étude géologique de la région a permis la reconnaissance et la cartographie à l'échelle du 1/12 500 de plusieurs unités géologiques homogènes dans les deux bassins versants. Les cartes du réseau hydrographique de ces deux bassins ont été réalisées à partir de la numérisation et du traitement sur écran des photographies aériennes non redressées des missions de 1952, 1963, 1974 et 1989, puis corrigées par le logiciel PhotoGIS à partir des coordonnées des marques de fond de chambre, de la focale, de quatre points de calage et d'un modèle numérique d'altitude. À partir des cartes géologiques, on a calculé la superficie de chaque unité lithologique dans les deux bassins versants. La superposition des cartes du réseau hydrographique sur les cartes géologiques a permis de déterminer la longueur des ravins dans chacune de ces unités. Le rapport de la longueur des ravins existants dans une unité lithologique sur la surface de celle-ci constitue la densité du ravinement dans cette unité, laquelle a été calculée dans chaque unité lithologique des bassins versants pour les années des photographies aériennes. Cela a amené à déterminer le taux annuel d'évolution de la densité du ravinement pour les trois périodes de 1952-1963, de 1963-1974 et de 1974-1989, pour chacune de ces unités dans les deux bassins versants.

On a ainsi identifié les unités lithologiques les plus sensibles au ravinement. Pour le bassin versant de l'oued El Hammam, la densité du ravinement des unités les plus représentées varie entre 274 m/ha et 594 m/ha en 1989. La plus forte densité se trouve dans la formation de Souar, datée du Lutétien-Priabonien et constituée de marnes jaunâtres parfois très gypseuses, avec un taux annuel d'évolution de 1,9 % entre 1952 et 1963. Pour le bassin versant de l'oued Rmel, l'unité la plus sensible au ravinement est le Glacis II, datée du Pléistocène supérieur et constituée de dépôts sablo-silteux à texture grossière, avec une densité de ravinement de 132 m/ha en 1989 et un taux annuel d'évolution de 2,4 % entre 1952 et 1963. On a aussi pu effectuer un classement de la susceptibilité à l'érosion par ravines des unités les plus représentées dans chacun des deux bassins versants.

Mots-clefs : ravinement ; unité lithologique ; photographies aériennes ; cartographie.

STUDY OF THE GULLY RATE BY LITHOLOGICAL UNITS IN THE WATER SHEDS OF OUEDS EL HAMMAM AND RMEL IN CENTRAL TUNISIA

Although, the main sebkha El Kalbia region is characterized by a semi-arid climate, the degradation of the natural vegetation and the irrational land use has resulted in an increase of the runoff rate and the intensification of water erosion resulting in the formation of badlands and a reduction of the cropped land. Research aims at assessing the evolution of gullies in the tow sub-basins of oued El Hammam and oued Rmel covering 198 ha and 1 534 ha respectively. To meet this objective, a geological survey of the region permitted the mapping many homogeneous geological units in the two basins at the scale of 1/12 500. The mapping of the drainage networks of these two basins has been carried out from the scanning, treatment and digitizing on screen from unrectified aerial photographs of 1952, 1963, 1974 and 1989 missions, the georectification was undertaken by the PhotoGIS software using the coordinates of fiducial marks, the focal of the camera lens, four ground control points and the digital elevation model. The overlaying of the drainage networks and the geological maps has allowed the calculation of the area of the various lithological units as well as the length of the gullies in each of these units. The gully density defined as the gullies length by unit area of lithological unit, has been calculated for the years of the aerial photographs. Then, we have calculated the annual growth rate of the gully density for the three periods of 1952-1963, 1963-1974 and 1974-1989, for each of these units. The results permitted to identify the most sensitive lithological unit to gullying. For the

* Correspondant principal

watershed oued El Hammam, the gully density in the main present lithologic unit varies from 274 m/ha to 594 m/ha in 1989. The highest density of 594 m/ha is in the Souar formation, dated Lutetian-Priabonian and made up of yellow marls sometimes mixed with gypsum, with an annual gully growth rate of 1,9 % between 1952 and 1963. For the watershed oued Rmel, the most sensitive unit to gullying is the Pleistocene superior deposit of Glacis II, made of sand and silty materials. In this unit, gully density of 132 m/ha in 1989 and an annual gully growth rate of 2,4 % from 1952 to 1963 were observed. That allowed to carry out a classification of the lithological units according to their susceptibility to gully formation.

Keywords : gullying ; lithological unit ; aerial photographs ; cartography.

1. INTRODUCTION

Malgré le fait qu'elle soit considérée comme l'un des processus les plus actifs de la dynamique actuelle des sols, l'érosion a été souvent présentée comme un danger majeur pour les sols, entraînant le décapage des horizons superficiels jusqu'à l'apparition de la roche mère (Roose, 1993).

L'érosion est causée par l'impact des gouttes de pluie et par le ruissellement qui engendrent une érosion en nappe, en rigoles et en ravines. L'érosion en nappe, due au ruissellement diffus, est le stade initial de la dégradation des sols. Le ruissellement diffus apparaît d'autant plus rapidement que la perméabilité du substratum rocheux est plus faible et que l'averse est intense et abondante. Il se traduit par l'étalement d'une fine pellicule d'eau coulant à la surface du sol (Monnier *et al.*, 1986). Mais le ruissellement des eaux a tendance à se concentrer, faisant apparaître des chenaux de drainage ou griffes qui évoluent en fonction de l'énergie du ruissellement en rigoles et ensuite en ravines de plus de 50 cm de profondeur qu'on ne peut plus effacer par les techniques culturales. Le stade ultime de cette érosion est le développement de ravins de plusieurs mètres de profondeur et de badlands, ou ravinement généralisé, lorsque la surface primitive a complètement disparu (Roose, 1994 ; De Ploey, 1973). Par photo-interprétation, on peut détecter les stades de l'érosion par ravinements ultérieurs à l'apparition des ravines.

Dans la région semi-aride de la Tunisie, les processus liés au ruissellement concentré (ravinement) occasionnent la proportion la plus importante de l'érosion hydrique qui affecte les terres (Hamza, 1994 ; Mtimet *et al.*, 1996).

Dans cette recherche, nous avons dans un premier temps étudié les relations entre la nature lithologique des différentes unités géologiques affleurant dans deux bassins versants et l'évolution de la densité du réseau hydro-graphique en fonction du temps. Dans un deuxième temps, nous avons effectué un classement de la susceptibilité de ces unités à l'érosion par ravines. La densité du ravinement est définie par le rapport de la longueur des ravins et ravines constituant le réseau hydrographique localisé sur une unité lithologique du bassin versant sur la superficie de cette unité.

La cartographie des différentes unités lithologiques et du chevelu de ravins répartis dans l'espace par les méthodes manuelles conventionnelles constitue un travail très long et fastidieux, étant donné que les surfaces et les arcs à mesurer sont relativement petits. L'acquisition des cartes tant géologiques que des réseaux hydrographiques par numérisation sur écran à partir de photographies aériennes numérisées s'avère alors beaucoup plus facile et rapide. En effet, plusieurs logiciels tel que ArcView assurent la numérisation directe sur écran et sont dotés d'une rapidité extraordinaire, ils exécutent les taches « zoom avant » « zoom arrière » et déplacement de fenêtre indispensable pour une digitalisation confortable sur écran. Ainsi, des agrandissements successifs, même dans les secteurs les plus sensibles de la zone d'étude, permettent de mieux interpréter l'image.

Le système d'information géographique (SIG) constitue pour notre travail un outil indispensable à la superposition des cartes des réseaux hydrographiques des différentes couvertures aériennes et des cartes géologiques des deux bassins versants avec une précision suffisante pour effectuer les mesures nécessaires à la détermination de l'évolution de la longueur des ravins par unité lithologique.

2. LOCALISATION

La région d'étude couvre les bassins versants des oueds El Hammam et Rmel faisant partie du grand bassin versant de l'oued Nebhana (figure 1). Cette zone est située dans la région de sebkha El Kalbia en Tunisie centrale à 40 km au nord de la ville de Kairouan. Le bassin versant de l'oued El Hammam, d'une superficie de 198 ha, est situé dans la partie septentrionale du Djebel Melez qui fait partie de l'axe nord-sud séparant la Tunisie centrale, à l'ouest, des basses steppes, à l'est. Le bassin versant de l'oued Rmel, d'une superficie de 1 534 ha, correspond au secteur situé entre les jebels El Hammam, au nord, et Bou Mazoula, au sud, les oueds El Hallouf, à l'ouest, et Ragouba Douib Mazoula, à l'est.

La région de sebkha El Kalbia appartient à l'étage bioclimatique semi-aride, caractérisé par une pluviométrie variable dans l'espace et dans le temps. L'irrégularité de la pluviosité est générale et s'exprime régulièrement par des variations à la fois saisonnières et interannuelles (figure 2).

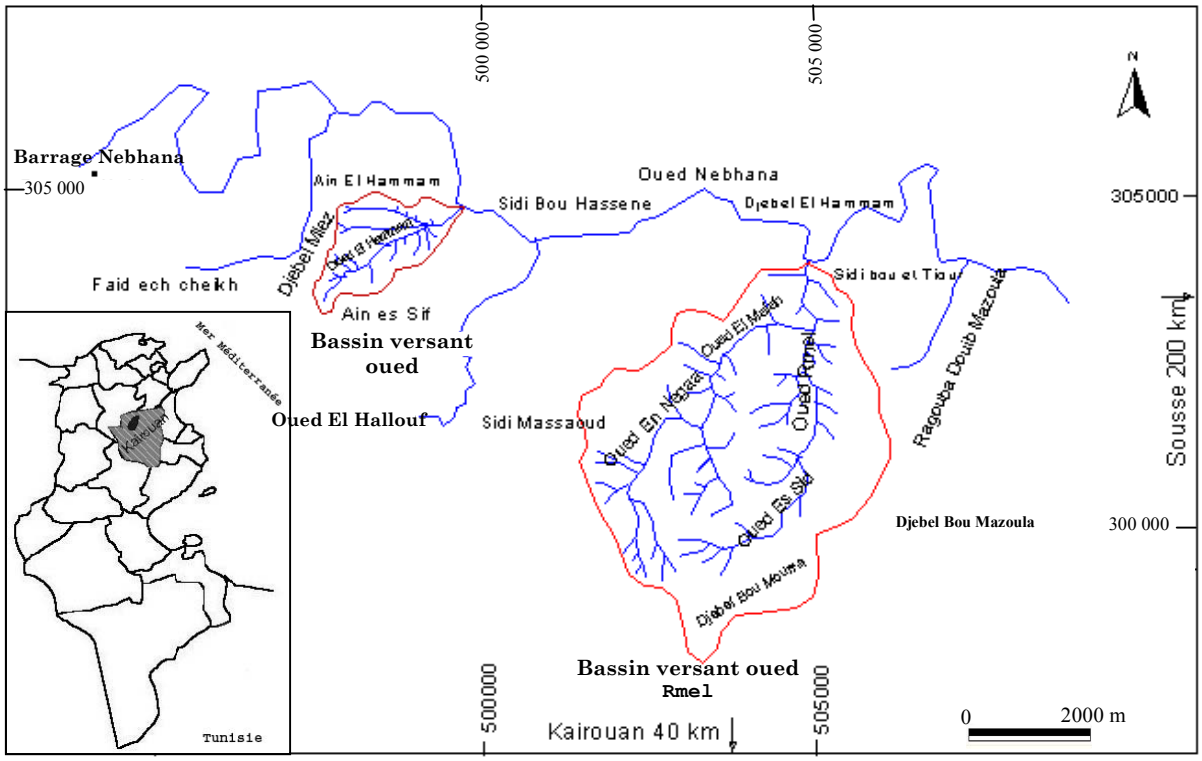


FIGURE 1 Localisation des deux bassins versants des oueds El Hammam et Rmel (Tunisie centrale). *Localization of the two watersheds of oueds El Hammam and Rmel (Central Tunisia).*

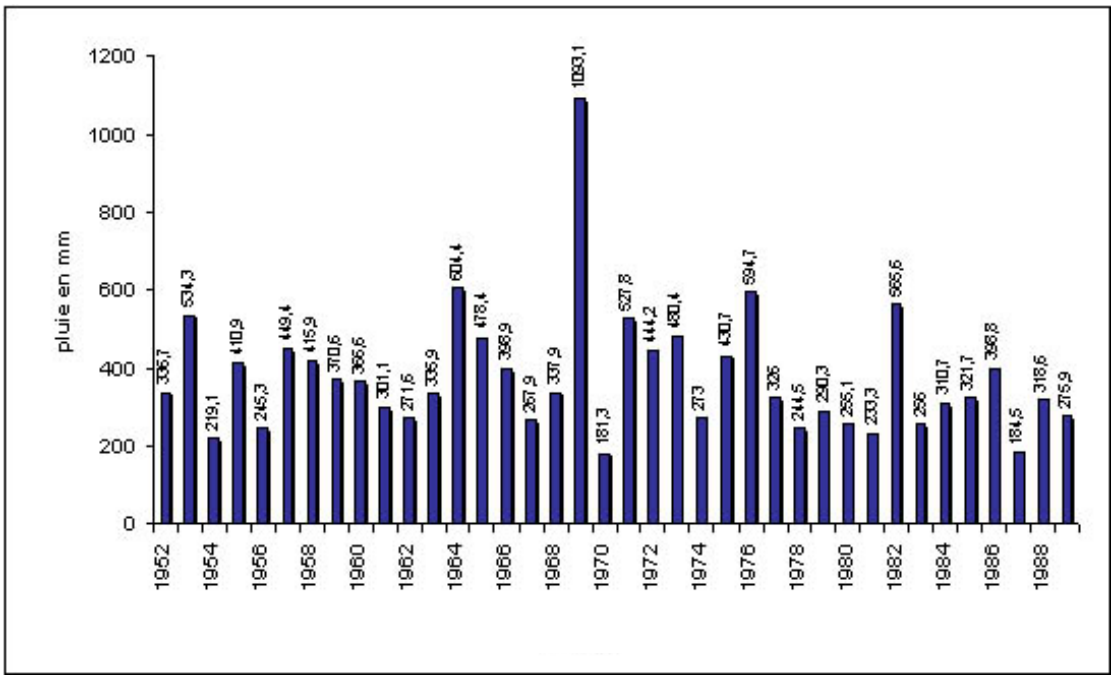


FIGURE 2 Variation annuelle de la pluviométrie. *Runoff yearly variation.*

3. MÉTHODOLOGIE

Le réseau hydrographique, correspondant à tout écoulement linéaire concentré sur la surface topographique qu'ils transforment progressivement (Deffontaines, 1990), peut être déterminée à partir des cartes topographiques, des photographies aériennes ou des levés de terrain. Comme les petits ravins ne sont pas souvent représentés sur les cartes topographiques, on a trouvé des différences importantes entre la densité des ravins déterminée à partir, d'une part des cartes topographiques et, d'autre part, des photographies aériennes (Eyles, 1966). Ainsi, pour une meilleure précision les réseaux hydrographiques des bassins versants des oueds El Hammam et Rmel ont été extraits par numérisation sur écran d'ordinateur, avec une résolution de 600 dpi, à partir de photographies aériennes non redressées des quatre missions de 1952, 1963, 1974 et 1989.

Étant donné les déformations des photographies résultant de l'erreur d'échelle de l'inclinaison de l'axe de prise de vue et du déplacement dû à l'influence du relief (Paul, 1990), une correction géométrique s'avère nécessaire. À côté des appareils photorestituteurs analogiques et numériques exigeant un important travail de préparation et dont le coût est extrêmement élevé, il se développe actuellement de nouveaux procédés de photorestitution sous forme de puissants logiciels, tel que le logiciel de photogrammétrie PhotoGIS exploitant au mieux la rapidité de calcul des ordinateurs modernes.

Le principe de PhotoGIS (figure 3) consiste en une succession de changements de repères permettant de passer d'un système de coordonnées « image » à un système de coordonnées « terrain ». Pour cela, PhotoGIS exige les coordonnées des marques de fond de chambre qui constituent les repères de la chambre métrique de l'appareil de prise de vue, la focale et au moins quatre points de calage pour le calcul des paramètres d'orientation de l'appareil de prise de vue (Salamanca Software, 1994). Par la suite, PhotoGIS effectue la restitution numérique du réseau hydrographique précédemment représenté sur les photographies aériennes à partir des données du modèle numérique d'altitude (MNA), produit par numérisation des courbes de niveau de la carte topographique à l'échelle du 1/25 000 et avec une précision moyenne de 10 m. Chaque point est alors positionné par interpolation successive de son altitude sur le MNA. Ainsi, l'image ne subit qu'une faible correction géométrique (une simple rotation) et seuls les réseaux hydrographiques issus de la numérisation sur écran sont corrigés des paramètres d'orientation pour passer d'un système à un autre. Étant donné la non disponibilité de cartes géologiques de la région, une étude géologique détaillée nous a permis la reconnaissance et la cartographie à partir des photographies aériennes de 1963 des différentes unités lithologiques considérées comme relativement homogènes et isotropes des deux bassins versants (figures 4 et 5). Ces formations lithologiques identifiées dans la région d'étude ont été définies en Tunisie par Burollet (1956). Les cartes géologiques issues de la numérisation des différentes unités à partir des photographies aériennes subissent la même correction que les cartes les réseaux hydrographiques.

La superposition des cartes des réseaux hydrographiques des différentes missions sur les cartes géologiques des deux bassins versants des oueds El Hammam et Rmel (figures 6 et 7) a été effectuée à l'aide du logiciel de SIG ArcView. Ce même logiciel a été utilisé pour le calcul de la surface de chaque unité lithologique et de la longueur du réseau hydrographique dans chacune de ces unités.

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Du fait de la mauvaise qualité des photographies aériennes de 1952 et de la présence de zones sombres qui couvrent parfois toute l'unité lithologique de faible superficie, nous n'avons considéré que les unités les plus étendues dans les deux bassins versants afin de pouvoir effectuer la meilleure interprétation possible. Ainsi, dans les bassins versants des oueds El Hammam et Rmel, 11 et 7 unités lithologiques relativement homogènes ont été respectivement identifiées (tableaux 1 et 2 ; figures 8 et 9). Parmi ces unités, quelques-unes seulement couvrent une superficie représentative (supérieure à 20 ha), à savoir la formation El Haria, la formation Souar et le Glacis II, dans le bassin versant de l'oued El Hammam, ainsi que les formations de l'Oligocène, de l'Aquitanien, de Beglia et le Glacis II, dans le bassin versant de l'oued Rmel. Les formations de l'oued El Hammam présentent toutes une perméabilité assez faible et sont constituées de matériaux meubles (marnes et argiles) tandis que les formations de l'oued Rmel présentent une perméabilité moyenne à forte et sont constituées en partie par des roches dures et compactes (bancs de grès, dépôts cimentés par du calcaire et du sable compact), les rendant résistantes à l'incision par le ruissellement concentré (Roose, 1994 ; Roose *et al.*,2000).

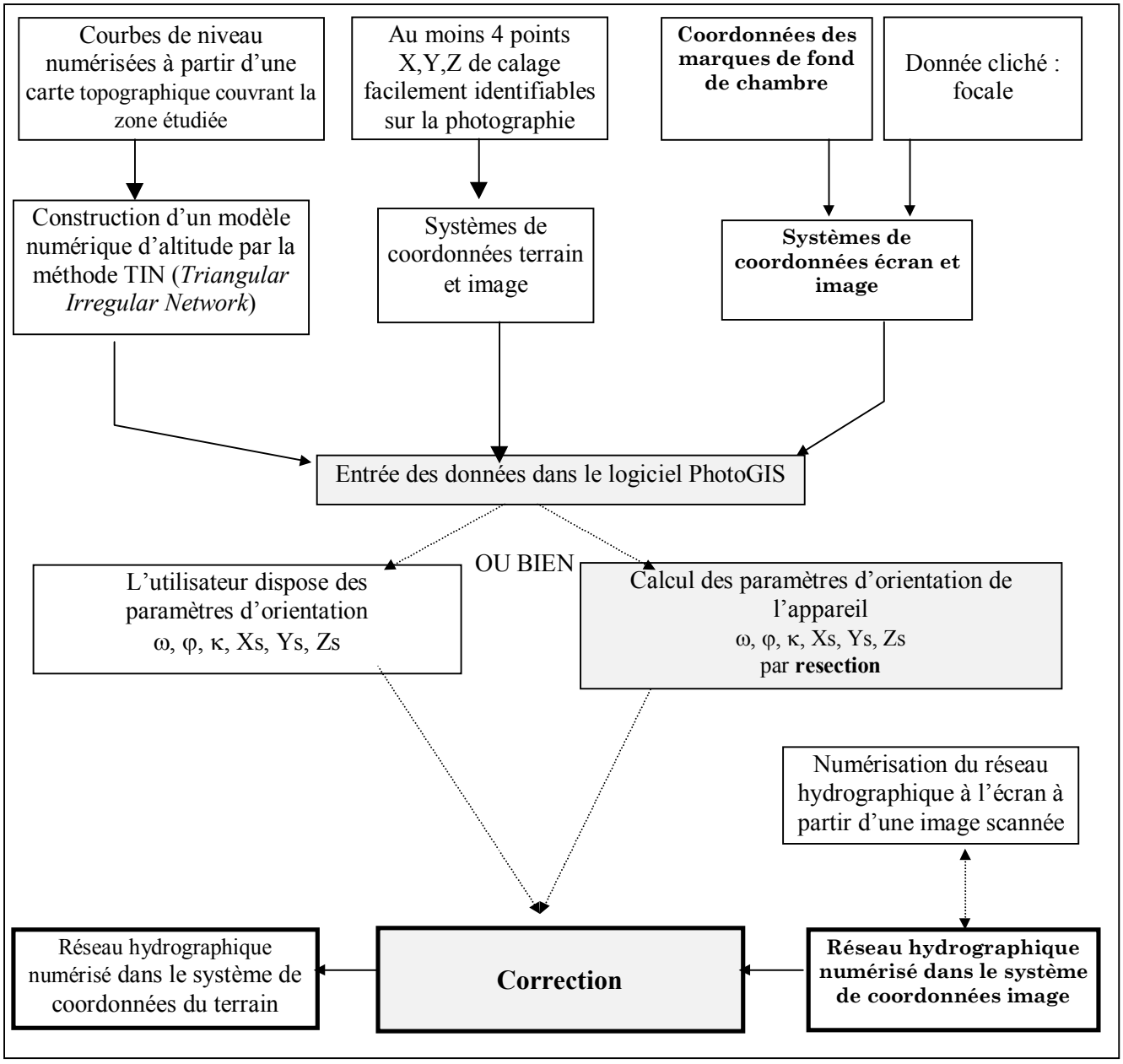


FIGURE 3 Principe du logiciel PhotoGIS. *Principle of the PhotoGIS software.*

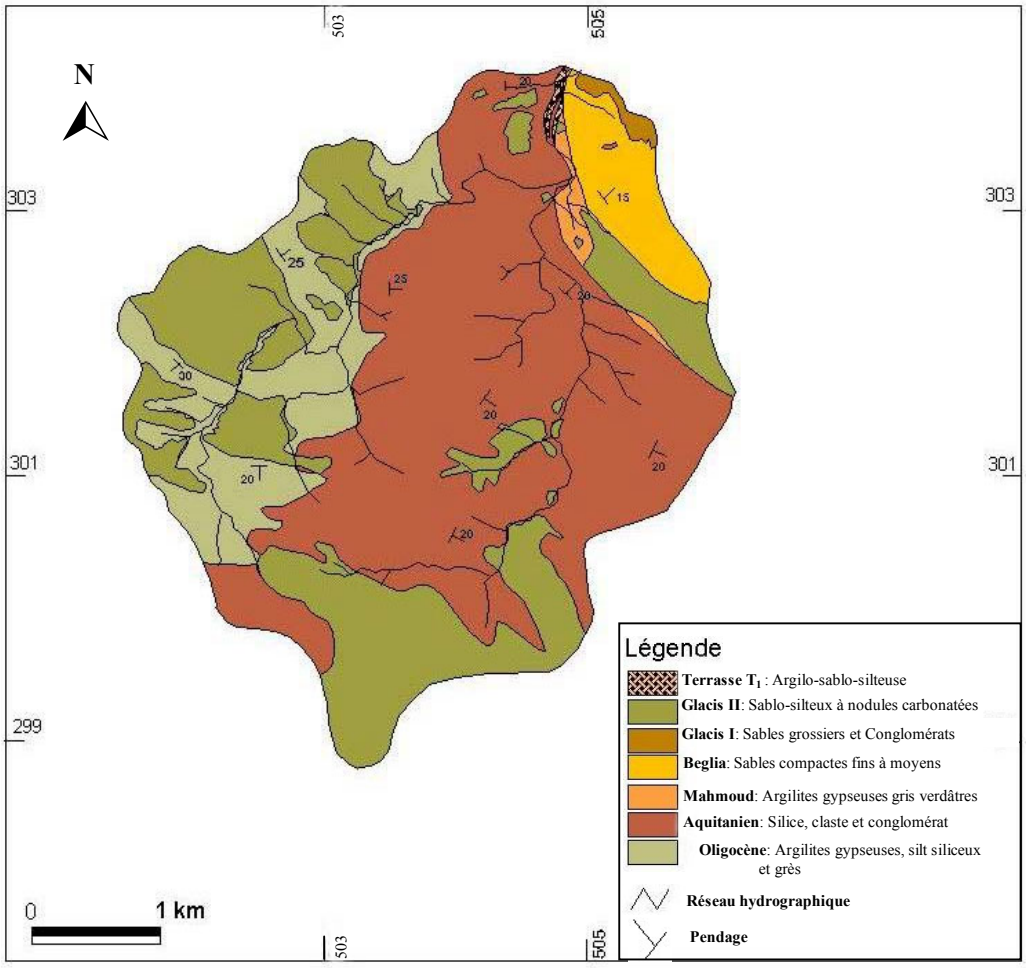


FIGURE 4 Carte géologique du bassin versant de l'oued Rmel. *Geological map of the Rmel watershed.*

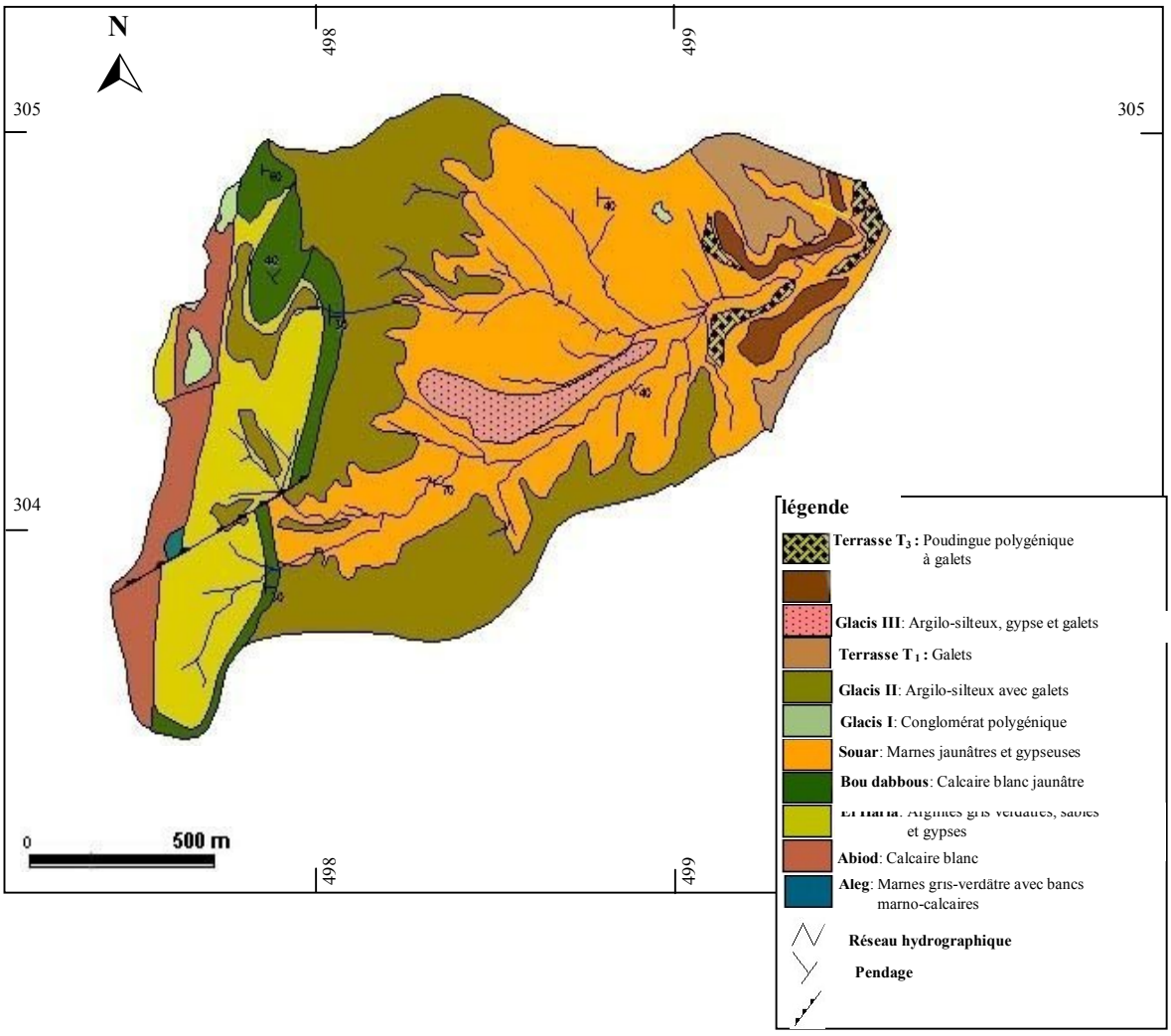
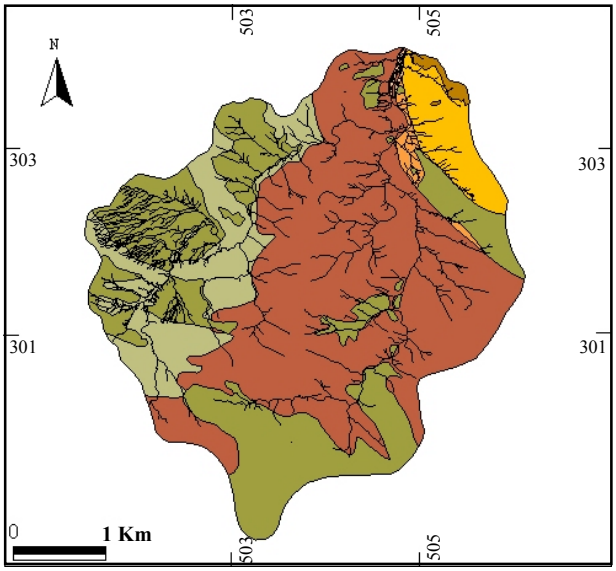
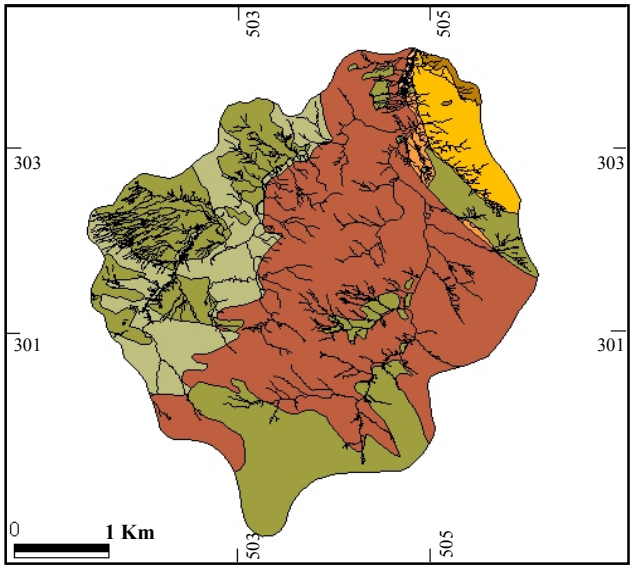


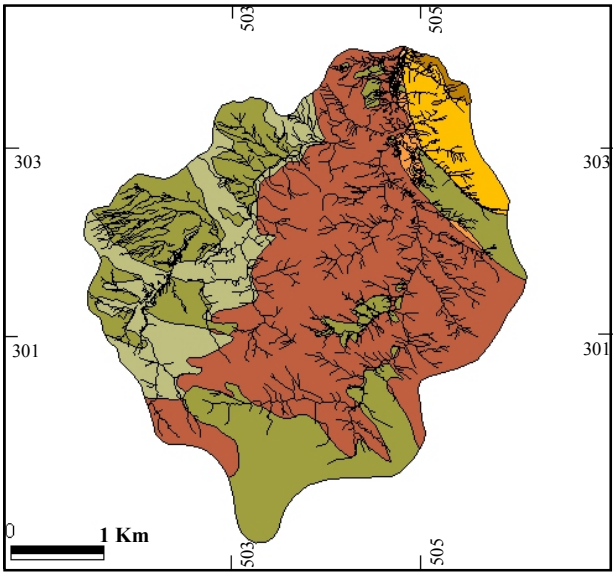
FIGURE 5 Carte géologique du bassin versant de l'oued El Hammam. *Geological map of the El Hammam watershed.*



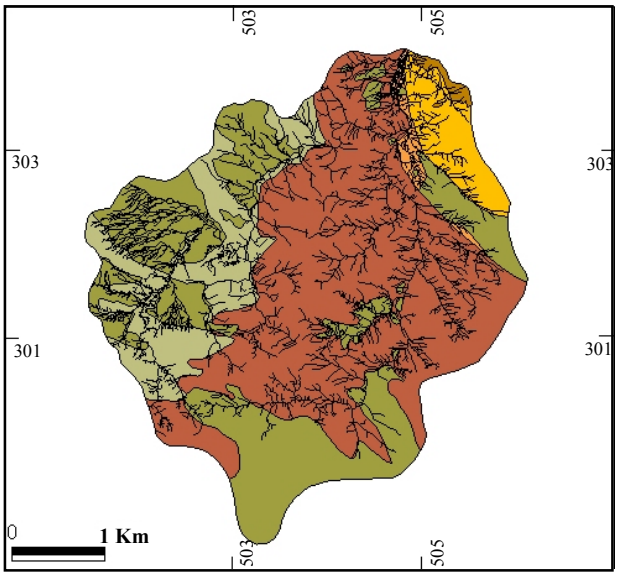
Réseau hydrographique en 1952.
The drainage network in 1952



Réseau hydrographique en 1963
The drainage network in 1963



Réseau hydrographique en 1974
The drainage network in 1974



Réseau hydrographique en 1989
The drainage network in 1989

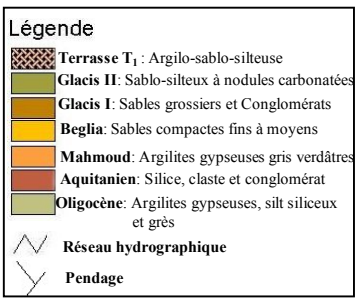
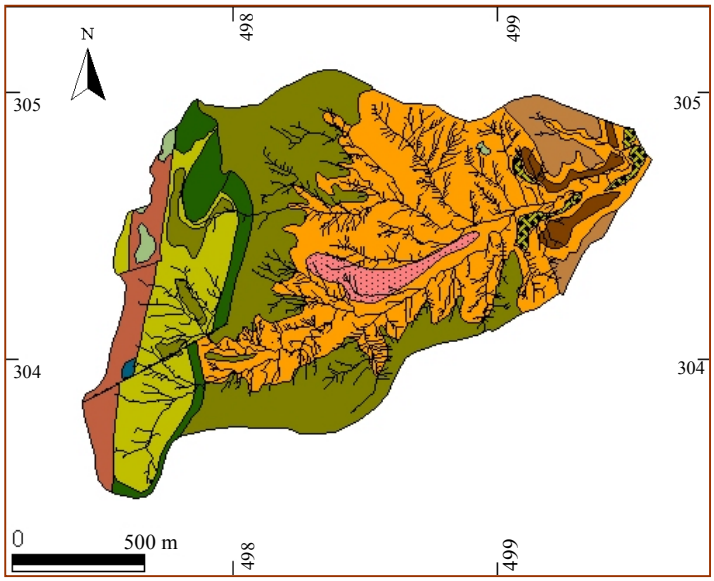
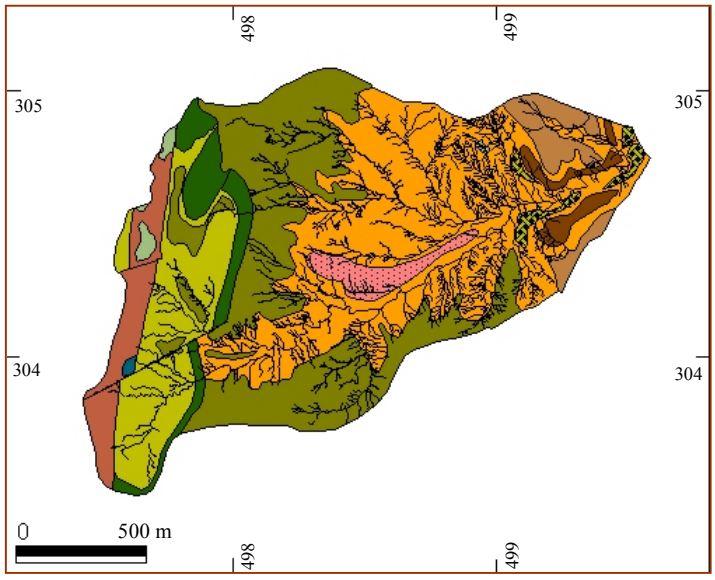


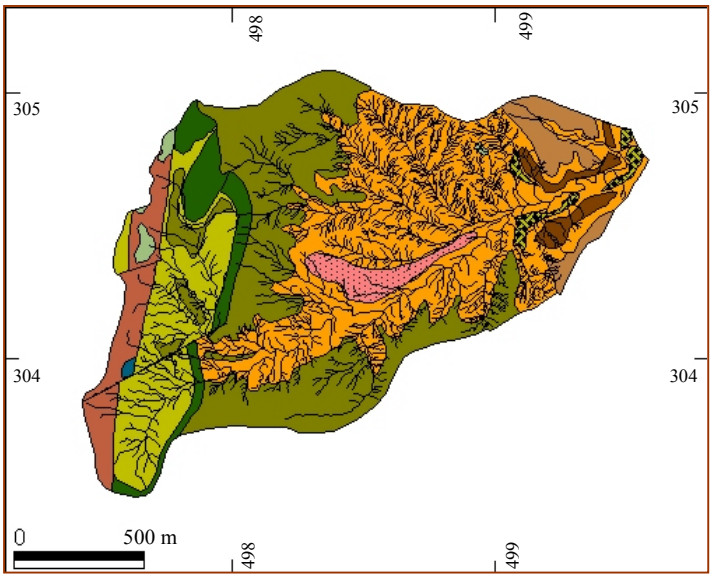
FIGURE 6 Superposition des réseaux hydrographiques sur la carte géologique du bassin versant de l'oued Rmel. *Overlaying of the drainage networks on the geological map of the Rmel watershed.*



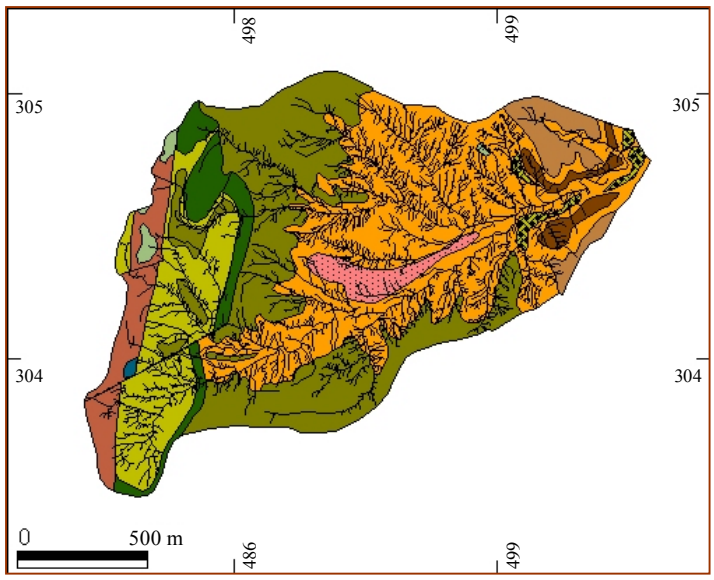
Réseau hydrographique en 1952. *The drainage network in 1952*



Réseau hydrographique en 1963. *The drainage network in 1963*



Réseau hydrographique en 1974. *The drainage network in 1974*



Réseau hydrographique en 1989. *The drainage network in 1989*

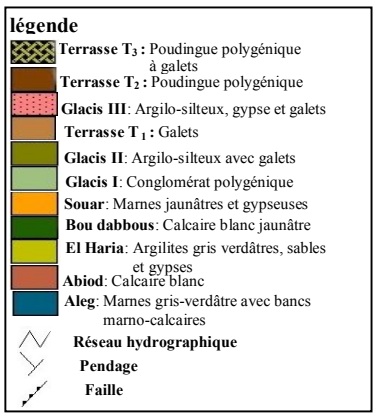


FIGURE 7 Superposition des réseaux hydrographiques sur la carte géologique du bassin versant de l'oued El Hammam. *Overlaying of the drainage networks on the geological map of the El Hammam watershed.*

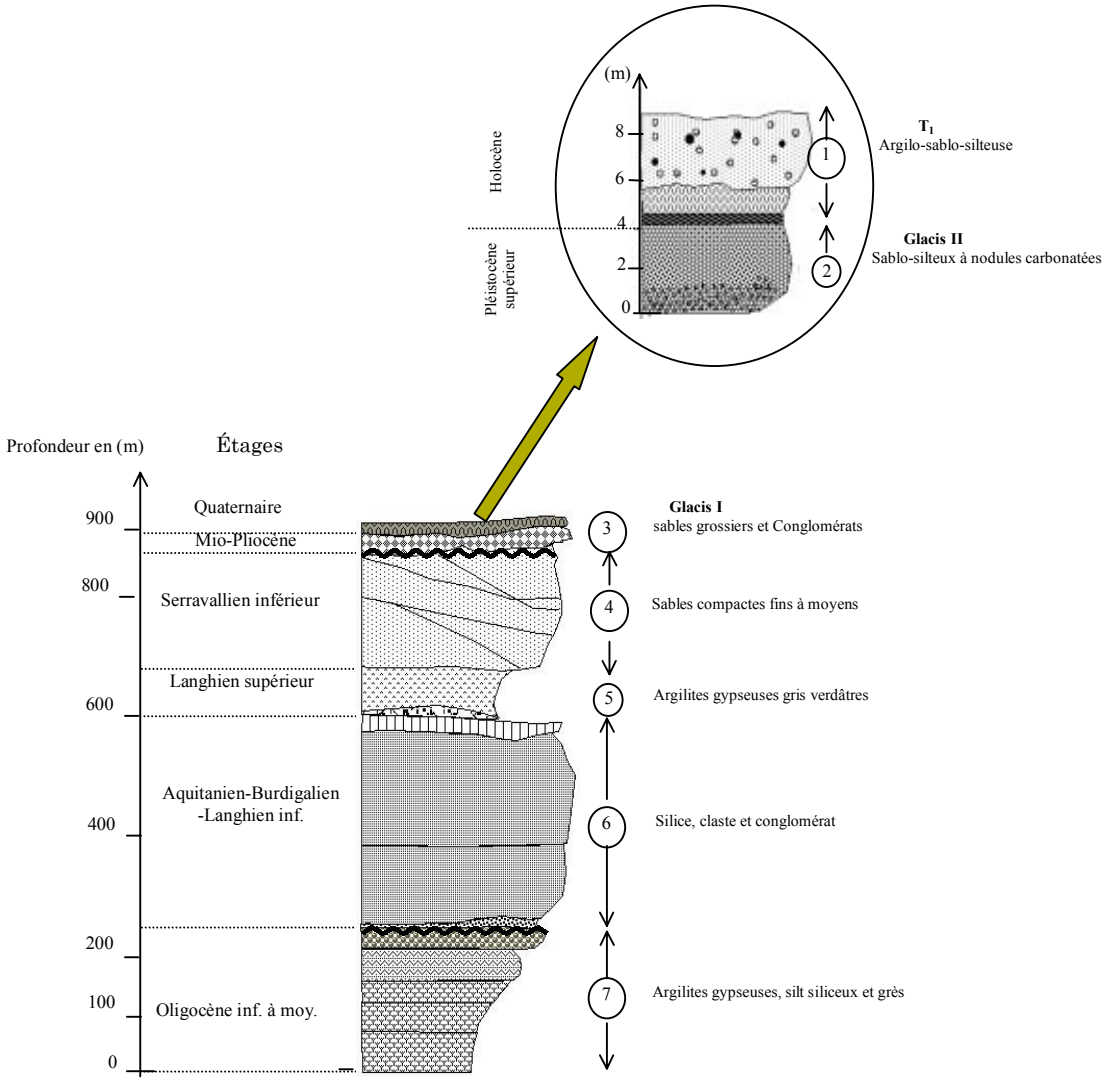


FIGURE 8 Colonne stratigraphique des différentes formations géologiques du bassin versant de l'oued Rmel. *Stratigraphic column of the different geological formations in the Rmel watershed.*

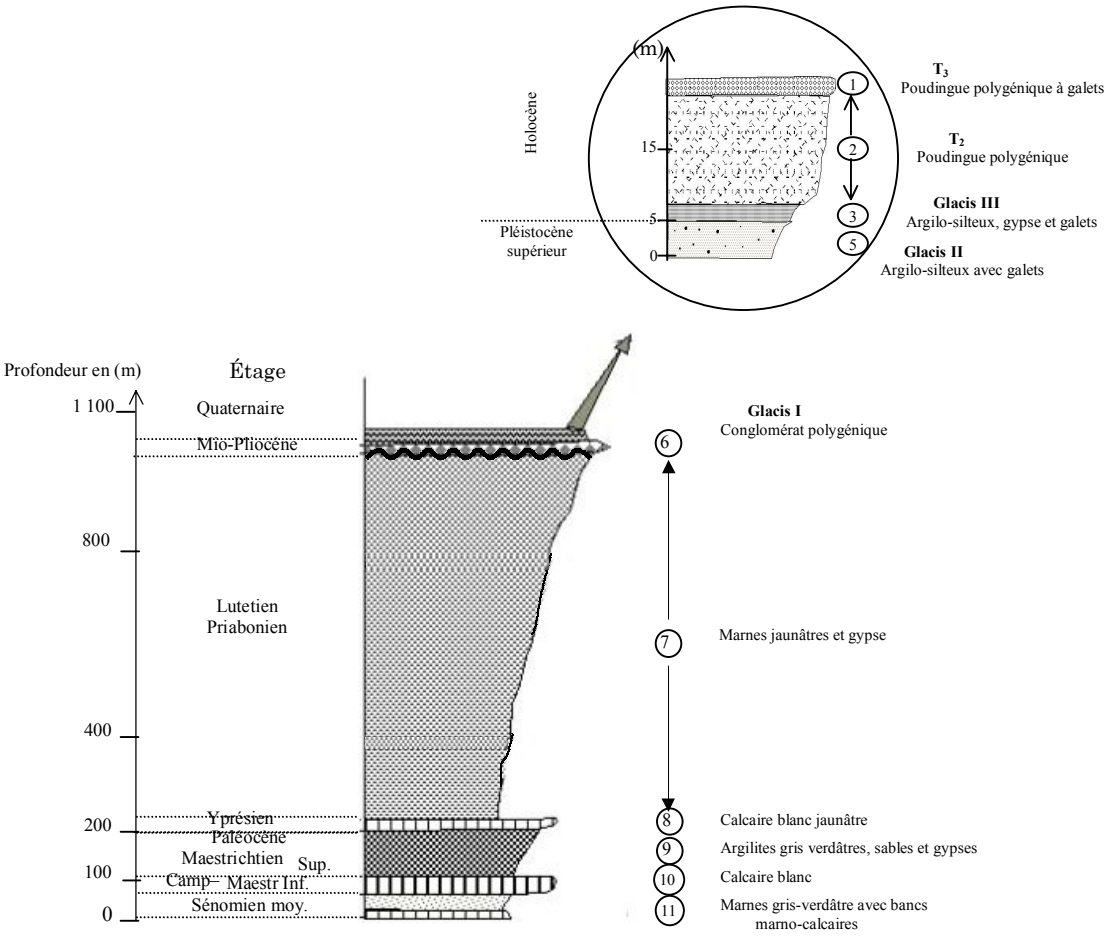


FIGURE 9 Colonne stratigraphique des différentes formations géologiques du bassin versant de l'oued El Hammam. *Stratigraphic column of the different geological formations in the El Hammam watershed.*

TABLEAU 1 Unités lithologiques du bassin versant de l'oued El Hammam. *Lithological units of the oued El Hammam watershed.*

Unité lithologique	**Formation et âges** en million d'année (Ma)	**Superficie (ha)**	**Caractéristiques**	Perméabilité
1	**Holocène (Terrasse T3)** 0,01 Ma - actuel	2	**Poudingue polygénique à galets empâtés de gypse à la base et à matrice argilo-silteuse**	–
2	Holocène (Terrasse T2) 0,01 Ma - actuel	4	Poudingue polygénique à matrice argilo-silteuse	+
3	Holocène (Glacis III) 0,01 Ma - actuel	5	Dépôt argilo-silteux renfermant des cristaux de gypse et des galets de différentes natures	+
4	Pléistocène supérieur (Terrasse T1) 0,1 Ma - 0,01 Ma	7	Dépôt constitué essentiellement de galets, fortement émoussés, de nature et de taille différentes	+ +
5	Pléistocène supérieur (Glacis II) 0,1 Ma - 0,01 Ma	55	Dépôt argilo-silteux à texture fine englobant des galets de taille et de nature différentes	+
6	Mio-Plio-Quaternaire (Glacis I) 6,5 Ma - 0,1 Ma	1	Conglomérat polygénique à ciment calcaire montrant des passées de grès grossiers à stratifications obliques et entrecroisées	+
7	Lutétien-Priabonien (Souar) 45 Ma - 34 Ma	78	Marnes jaunâtres parfois très gypseuses renfermant des débris d'huîtres	–
8	Yprésien (Bou Dabbous) 53 Ma-45 Ma	10	Barre de calcaire blanc jaunâtre à globigérines, très diaclasé	+ +
9	Maestrichtien supérieur-Paléocène (El Haria) 64 Ma - 53 Ma	25	Argilites gris verdâtres, sableuses, renfermant des nodules de gypse imprégnés de limonite	–
10	Campanien-Maestrichtien inférieur (Abiod) 83 Ma - 64 Ma	11	Calcaire blanc lité en bancs fortement diaclasé	+ +
11	Sénonien inférieur (Aleg) 88 Ma - 83 Ma	< 1	Marnes gris-verdâtre intercalées avec quelques bancs décimétriques marno-calcaires	–

– très peu perméable + + moyennement perméable

+ peu perméable + + + très perméable

TABLEAU 2 Unités lithologiques du bassin versant de l'oued Rmel. *Lithological units of the oued Rmel watershed.*

Unité lithologique	Formation et âges en million d'année (Ma)	Superficie (ha)	Caractéristiques	Perméabilité
1	Holocène (TerrasseT1) 0,01 Ma - actuel	4	Dépôt argilo-sablo-silteux englobant des galets de nature et de taille différentes	+ +
2	Pléistocène supérieur (Glacis II) 0,1 Ma - 0,01 Ma	466	Dépôt sablo-silteux à texture grossière renfermant des concrétions et des nodules carbonatées	+ +
3	Mio-Plio-Quaternaire (Glacis I) 6,5 Ma - 0,1 Ma	9	Conglomérats polygéniques et sables grossiers reposants en discordance angulaire sur les différents terrains antérieurs	+ + +
4	Serravallien inférieur (Beglia) 14,5 Ma - 13 Ma	81	Sables compacts, jaunâtres, fins à moyens, à stratifications obliques et entrecroisées	+ +
5	Langhien supérieur (Mahmoud) 15,5 Ma - 14,5 Ma	17	Argilite gypseuse gris verdâtre et glauconieuse à la base	–
6	Aquitanien-Burdigalien-Langhien inférieur (Fortuna sommitale - Ain Grab) 23 Ma – 15,5 Ma	749	Dépôt silici-clastique cimenté par du calcaire dans sa partie sommitale. L'Aquitanien est relayé par un mètre de conglomérat à dragées de quartz renfermant des pectinidés	+ + +
7	Oligocène inférieur à moyen (Fortuna basale) 34 Ma – 27 Ma	210	Empilement de plusieurs séquences élémentaires constituées par des argilites gypseuses à la base recouverte par du silt siliceux sur lequel repose un banc dur de grès roux ferruginisé	+ +

– très peu perméable + + moyennement perméable
+ peu perméable + + + très perméable

Ces deux caractéristiques physiques et mécaniques des unités lithologiques expliquent la variation de la densité du ravinement constatées pour les deux bassins versants. En effet, les unités lithologiques du bassin versant de l'oued El Hammam présentent une densité de ravinement beaucoup plus forte que celle de l'oued Rmel, comme on le montre sur les tableaux des annexes 1 et 2 et ce pour toutes les années étudiées.

La susceptibilité à l'érosion en ravines des différentes unités lithologiques est déterminée à partir du critère de la densité du réseau hydrographique, définie comme étant le rapport de la longueur des ravins existants dans une unité lithologique sur la surface de celle-ci dans le cas où, à l'état initial, cette densité serait différente d'une unité à l'autre. Dans le cas où les unités auraient des densités rapprochées, un deuxième critère est utilisé, soit le taux annuel d'évolution de la densité du ravinement au niveau de chaque unité lithologique pour une période donnée au cours de laquelle il n'y a eu aucun changement brusque du milieu naturel ni intervention artificielle de l'humain.

Du fait de la faible superficie des deux bassins versants, toutes leurs unités lithologiques ont reçu la même pluviosité au cours d'une même période bien que la variation inter-périodique soit importante. En effet, l'analyse statistique de la pluviométrie de la région d'étude nous montre une irrégularité de la pluviosité. D'une année à l'autre, les hauteurs enregistrées peuvent varier du simple au double, même plus lors des pluies exceptionnelles (figure 2). Ainsi, la deuxième période (1963-1974) marquée par une pluviosité plus abondante et des événements pluvieux qui ont duré plusieurs jours (pendant les crues de 1969) peut expliquer l'évolution plus importante

du ravinement durant cette période dans la majorité des unités lithologiques.

4.1. Ravinement dans le bassin versant de l'oued El Hammam

Les courbes d'évolution de la densité du réseau hydrographique en fonction du temps du bassin versant de l'oued El Hammam (figure 10) nous montrent que l'évolution la plus importante durant les trois périodes de 1952-1963, 1963-1974 et 1974-1989 se rencontre dans la formation Souar, constituée de marnes gypseuses. Cette densité évolue de 388 m/ha en 1952 à 594 m/ha en 1989. Ainsi, la formation de Souar est considérée la plus susceptible à l'érosion par ravines à cause de sa très faible perméabilité due à sa texture argileuse et à sa structure très instable par la présence de gypse.

Pour la formation El Haria et celle du Glacis II, nous constatons que, durant la période 1952-1963, la densité du réseau hydrographique est presque la même (annexe 1) : elle évolue de 160 à 176 m/ha pour la formation El Haria et de 135 à 186 m/ha pour le Glacis II. Au cours de la période de 1963-1974 et suite à l'abondante pluviosité marquant cette période, cette densité évolue plus rapidement dans la formation El Haria que dans le Glacis II. La plus faible densité du réseau hydrographique se trouve dans le Glacis II avec 186 m/ha et 241 m/ha, respectivement en 1963 et 1974. Ceci a été confirmé par le résultat de calcul du taux annuel d'évolution de la densité du ravinement (tableau 3) pour la période de 1963-1974. Cette densité est de 6 % pour le Glacis II et de 2,5 % pour la formation d'El Haria. Ainsi, le Glacis II de nature argilo-silteuse est alors l'unité lithologique la moins susceptible à l'érosion par ravines. Malgré sa texture fine, la présence de galets dans le Glacis II a conféré à cette unité une plus forte perméabilité que celle de la formation d'El Haria qui, d'après les résultats statistiques, est considérée la plus susceptible à l'érosion par ravines. En effet, les sols à texture fine et peu perméable sont plus vulnérables au ravinement (Roose, 1994 ; Le Bissonnais *et al.*, 1990).

En comparant l'évolution annuelle de la densité du ravinement au cours des trois périodes (tableau 3), nous remarquons que cette densité n'évolue pratiquement plus dans la formation Souar bien qu'elle soit formée de matériaux tendres et peu perméables. Cette diminution s'explique par le fait que le ravinement n'évolue plus en longueur dans ces formations. L'encaissement vertical des ravins cède la place à l'érosion latérale. On enregistre alors la disparition des interfluves au moment des crues, ce qui correspond au stade ultime du ravinement et l'installation des badlands.

4.2. Ravinement dans le bassin versant de l'oued Rmel

Pour le bassin versant de l'oued Rmel, les résultats de calcul de la densité du réseau hydrographique dans chaque unité lithologique (figure 11 et annexe 2) nous montrent, qu'en 1952, la formation de l'Aquitanien et celle de Beglia présentent des densités de ravinement presque similaires mais plus faibles que celles de l'Oligocène et du Glacis II qui, elles aussi sont assez proches. Ces densités sont respectivement de 54 m/ha et 63 m/ha pour l'Aquitanien et celle de Beglia, et de 92 m/ha et 87 m/ha pour l'Oligocène et le Glacis II. Ainsi, en se basant sur le critère de la densité du ravinement, on peut classer la formation de l'Aquitanien et celle de Beglia comme étant moins susceptibles à l'érosion par ravines que les formations de l'Oligocène et du Glacis II. Maintenant, pour pouvoir identifier l'unité la plus érodable dans chaque paire d'unités, nous avons utilisé le deuxième critère qui est le taux annuel d'évolution de la densité du ravinement dans chaque unité lithologique.

Si nous considérons le taux annuel d'évolution de la densité du ravinement (tableau 4), nous constatons une évolution plus importante dans la formation de l'Aquitanien que dans celle de Beglia durant les 2e et 3e périodes. Le taux de cette évolution est respectivement de 3,5 % et de 2,4 %, pour la période de 1963-1974, et de 2,2 % et de 1 %, pour la période de 1974-1989, tandis que cette tendance s'inverse pour la période de 1952-1963. Ceci résulte essentiellement des difficultés rencontrées dans l'interprétation des photographies aériennes de 1952 qui sont de mauvaise qualité. Pour cela, nous n'avons considéré que les 2e et 3e périodes pour effectuer le classement de ces deux unités lithologiques. Ainsi, la formation de Beglia est considérée la moins susceptible à l'érosion par ravines. En effet, la consolidation des sables compacts de celle-ci lui a conféré une plus grande résistance à l'incision.

En comparant l'Oligocène et le Glacis II, nous remarquons une importante régression du réseau hydrographique dans le Glacis II pendant la période de 1963-1974 (figure 6). En effet, après observation des différentes couvertures des photographies aériennes, nous avons constaté que des travaux de conservation des eaux et du sol (CES), sous forme de banquettes suivant les courbes de niveau (figure 12), ont été réalisés dans les formations de l'Oligocène et du Glacis II en 1963 et ont persisté jusqu'à 1974. Ainsi, les travaux de CES réalisés au cours de la période de

1963-1974 ont été à l'origine d'une perturbation de l'évolution du ravinement, ce qui a rendu impossible d'effectuer un classement de la susceptibilité à l'érosion de ces différentes unités. Ceci a été confirmé par les résultats de calcul du taux annuel d'évolution de la densité du ravinement (tableau 4) qui montrent, pendant la deuxième période, une évolution négative de -1,4 % pour le Glacis II et une diminution du taux d'évolution dans la formation de l'Oligocène, qui ne représente plus que 0,6 %. Après 1974, nous constatons la réinstallation du réseau hydrographique dans ces mêmes unités. En effet, le taux annuel d'évolution de la densité du ravinement au cours de la période de 1974-1989 a atteint 3,1 % pour le Glacis II et 2,7 % pour l'Oligocène. Ceci résulte essentiellement de la disparition progressive des banquettes qui n'ont pas été entretenues depuis leur réalisation.

Ainsi, seuls les résultats de la période de 1952-1963 ont permis d'effectuer un classement des unités lithologiques 1 et 6 et d'identifier l'unité la plus érodable. Le taux annuel d'évolution de la densité du ravinement est de 1,1 % pour l'Oligocène et de 2,4 % pour le Glacis II. Le Glacis II, formée d'un dépôt sablo-silteux, est alors plus susceptible à l'érosion que l'Oligocène qui présente un banc dur de grès le rendant résistant à l'érosion des eaux de ruissellement.

Le classement des différentes unités lithologiques de l'oued Rmel, en fonction de leur susceptibilité à l'érosion par ravines par ordre décroissant est : le Glacis II, l'Oligocène, Beglia et l'Aquitanien.

5. CONCLUSION

Dans cette recherche, nous avons montré que l'érosion par ravinement évolue de manière différentielle en fonction de la nature des formations géologiques, qui est considérée comme un des paramètres principaux contrôlant le développement des ravins, confirmant ainsi les résultats que nous avons obtenus dans d'autres bassins versants de la même région. Le rôle du paramètre pluviométrique sur le développement des ravins (Stocking, 1978) a été confirmé pour la période de 1963-1974. L'abondance et la fréquence des pluies enregistrées au cours de cette période (en particulier la crue de 1969), auxquelles s'ajoute la nature lithologique de certaines unités qui s'avèrent très vulnérables au ravinement, tel que l'unité 3 du bassin versant de l'oued El Hammam, étaient à l'origine d'une importante évolution du ravinement comparé à la période de 1952-1963.

Ainsi, l'étude de l'évolution du ravinement dans les différentes unités lithologiques des deux bassins versants nous a amenés à effectuer un classement général de la susceptibilité de ces différentes unités à l'érosion par ravines. Selon un ordre décroissant nous avons, dans le bassin versant de l'oued El Hammam, la formation Souar de nature marno-gypseuse, la formation d'El Haria de nature argilo-sableuse à nodules de gypses et le Glacis II constitué d'un dépôt argilo-silteux renfermant des galets. Dans le bassin versant de l'oued Rmel, nous avons le Glacis II de nature sablo-silteux à texture grossière, l'Oligocène constitué d'argilites gypseuses du silt siliceux et d'un banc dur de grès, la formation de Beglia constituée de sables compacts et l'Aquitanien de nature silici-clastique cimenté par du calcaire.

Les résultats obtenus nous ont permis d'identifier les unités lithologiques les plus susceptibles à l'érosion par ravinement et donc celles qui nécessitent une priorité d'intervention pour réduire au maximum ce fléau.

La réduction du phénomène d'érosion par les travaux de conservation des eaux et du sol a été confirmée par l'importante réduction de la densité du réseau hydrographique dans l'unité 6 au cours de la période de 1963-1974. Ainsi, contrairement à ce que pensent les géomorphologues (Heusch, 1986), les résultats statistiques obtenus pour cette période témoignent de l'efficacité des banquettes ; seulement, la majorité des aménagements n'étaient pas entretenus par les paysans et ont été détruits progressivement (Roose *et al.*, 1993).

L'approche concernant la correction des cartes du réseau hydrographique, obtenues par numérisation à partir de photographies aériennes multidates non redressées en utilisant les marques de fond de chambre, la focale, quatre points de calage et un MNA, a permis de résoudre les problèmes de photogrammétrie et de produire des cartes superposables aux cartes géologiques. Cette correction dépendait de la précision des coordonnées des points de calage et de la qualité du modèle numérique d'altitude.

Ces travaux seront poursuivis par une quantification du transport solide résultant de l'érosion en ravines, et ce en tenant compte, outre le facteur lithologique dont on a montré l'importance, des facteurs topographique, pluviométrique et de végétation.

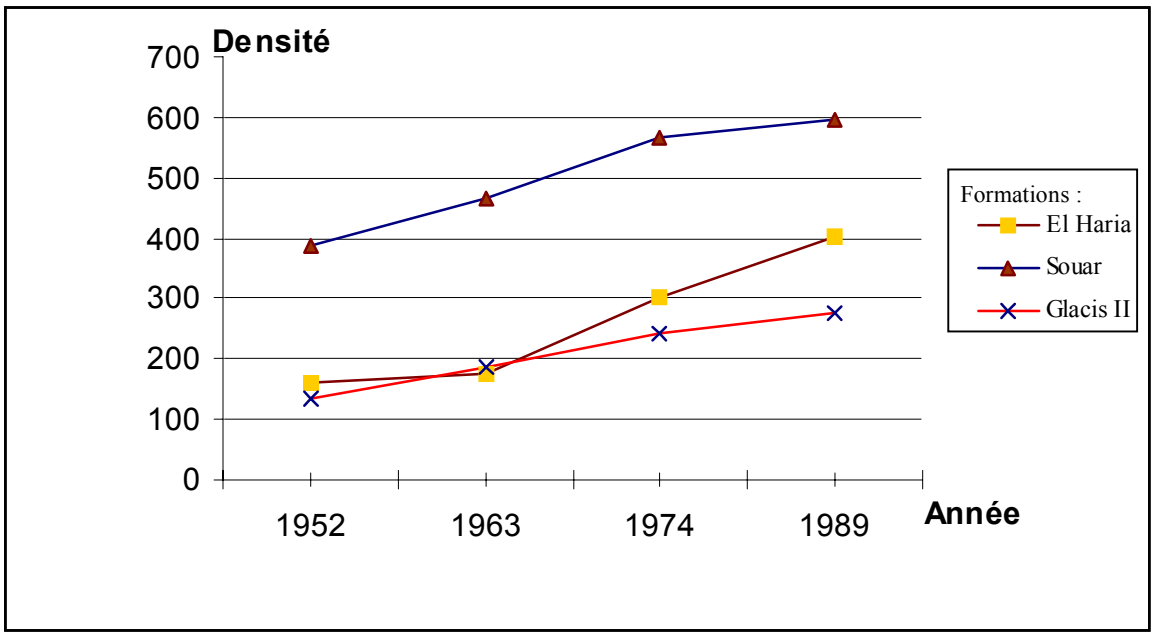


FIGURE 10 Évolution de la densité du réseau hydrographique en fonction du temps dans le bassin versant de l'oued El Hammam. *Evolution of the drainage network density in the oued El Hammam watershed.*

TABLEAU 3 Taux annuels d'évolution de la densité du ravinement par unité lithologique pour les trois périodes dans le bassin versant de l'oued El Hammam. *Annual density growth rate of gullies by lithological unit for the three periods in the oued El Hammam watershed.*

Période	1952-1963 (10,41 années = 3 802 jours)	1963-1974 (11,66 années = 4 256 jours)	1974-1989 (14,58 années = 5 342 jours)
Unité lithologique	Taux d'évolution (%)	Taux d'évolution (%)	Taux d'évolution (%)
9	1	6,1	2,3
7	1,9	1,8	0,4
5	3,6	2,5	1

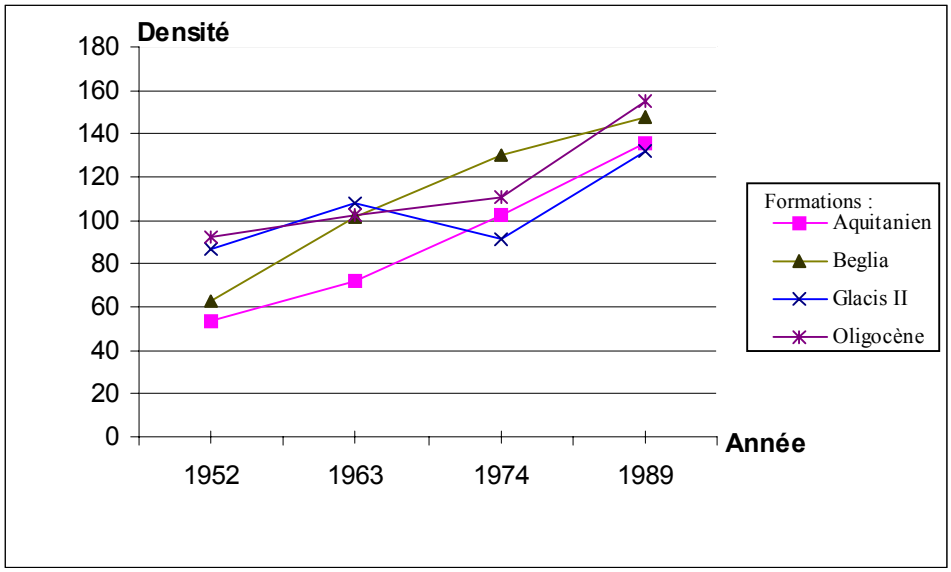


FIGURE 11 Évolution de la densité du réseau hydrographique en fonction du temps dans le bassin versant de l'oued Rmel. *Evolution of the drainage network density in the oued Rmel watershed.*

TABLEAU 4 Taux annuels d'évolution de la densité du ravinement par unité lithologique pour les trois périodes dans le bassin versant de l'oued Rmel. *Annual density growth rate of gullies by lithological unit for the three periods in the oued Rmel watershed.*

Période	1952-1963 (10,41 années = 3 802 jours	1963-1974 (11,66 années = 4 256 jours)	1974-1989 (14,58 années = 5 342 jours)
Unité lithologique	Taux d'évolution (%)	Taux d'évolution (%)	Taux d'évolution (%)
7	1,1	0,6	2,7
6	3,3	3,5	2,2
4	5,8	2,4	1
2	2,4	-1,4	3,1

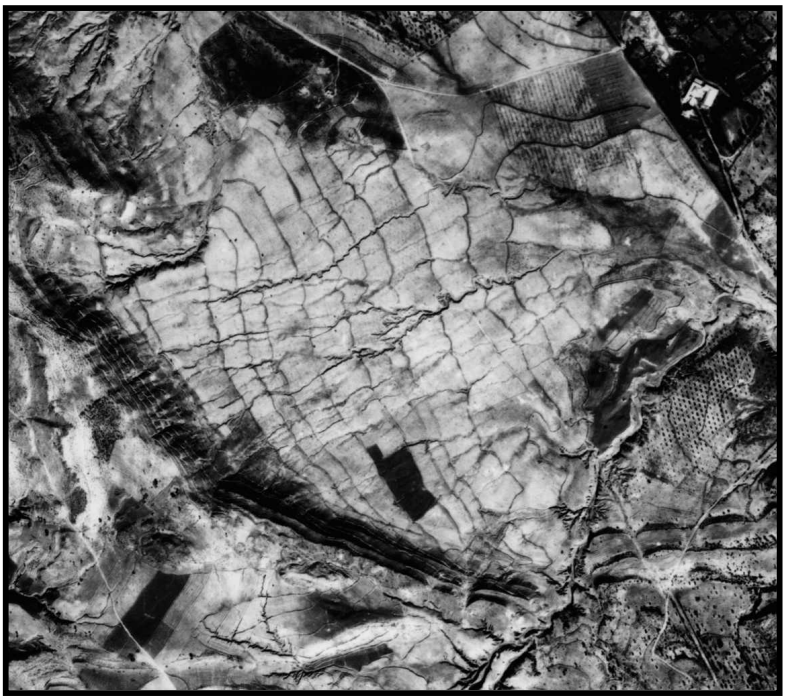


FIGURE 12 Photographie aérienne (mission 1974) montrant la réinstallation du réseau hydrographique dans l'unité du Glacis II du bassin versant de l'oued Rmel. *Aerial photograph showing the reinstalment of the hydrographic network in the Glacis II unit of the oued Rmel watershed.*

ANNEXE 1 Évolution du ravinement par unité lithologique dans le bassin versant de l'oued El Hammam. *The gullying growth by lithological unit in the oued El Hammam watershed.*

Année			**1952**		**1963**		**1974**		**1989**	
Unité lithologique	Formation	Surface (ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)
9	**El Haria**	25	4 001	**160**	4 412	**176**	7 533	**301**	10 080	**403**
7	**Souar**	78	30 233	**388**	36 219	**464**	44 013	**564**	46 348	**594**
5	**Glacis II**	55	7 418	**135**	10 215	**186**	13 233	**241**	15 058	**274**

ANNEXE 2 Évolution du ravinement par unité lithologique dans le bassin versant de l'oued Rmel. *The gullying growth by lithological unit in the oued Rmel watershed.*

Année			**1952**		**1963**		**1974**		**1989**	
Unité lithologique	Formation	Surface (ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)	Longueur (m)	Densité (m/ha)
7	**Oligocène**	**210**	19 338	**92**	21 593	**103**	23 224	**111**	32 498	**155**
6	**Aquitanien**	**749**	40 412	**54**	54 202	**72**	76 599	**102**	101 381	**135**
4	**Beglia**	**81**	5 096	**63**	8 201	**101**	10 515	**130**	11 969	**148**
2	**Glacis2**	**466**	40 359	**87**	50 485	**108**	42 346	**91**	61 644	**132**

Remerciements

Nos remerciements s'adressent d'abord à Jean-Marie Dubois pour l'intérêt qu'il a apporté à cette étude, et aux évaluateurs, en particulier Léo Provencher, du Département de géographie et télédétection de l'Université de Sherbrooke (Canada), pour avoir corrigé cet article.

Références

Burollet, P.F. (1956) Contribution à l'étude stratigraphique de la Tunisie centrale. République Tunisienne, Ministère des travaux publics, service des Mines, de l'industrie et de l'énergie. Annales des mines et de la géologie, n° 18, Tunis, 352 p.

Deffontaines, B. (1990) Développement d'une méthodologie morphonéotectonique - Analyse des surfaces enveloppes du réseau hydrographique et des MNT. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, 225 p.

De Pleoy, J. (1973) Ruissellement diffus, ravinement et badlands dans le bassin versant de Kasserine (Tunisie steppique). Livre Jubilaire M. Solignac. Annales des mines et de la géologie, n° 26, Tunis, p. 583-593.

Eyles, R.J. (1966) Stream representation on Malayan maps. Journal Tropical Geography, vol. 22, p. 1-9.

Hamza, A. (1994) Équilibre et déséquilibre dans quelques piémonts des hautes steppes tunisiennes. Études méditerranéennes n° 18, Fascicule de Recherche n° 26, Centre d'Étude et de Recherches sur l'Urbanisation du Monde Arabe (URBAMA), VIe Colloque de Sefrou, 9-11 avril 1992, Maroc, p. 47-62.

Heusch, B. (1986) Cinquante ans de banquettes de D.R.S. – C.E.S. en Afrique du Nord : un bilan. Cahiers ORSTOM, Série pédologique, vol. XXII, n° 2, p. 153-162.

Le Bissonnais, Y., Bruand, A et Jamagne, M. (1990) Étude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodabilité des sols. Cahiers ORSTOM, Série pédologique, vol. XXV, n° 1-2, p. 31-40.

Monnier, G., Boffin, J. et Papy, F. (1986) Réflexion sur l'érosion hydrique en conditions climatiques et topographiques modérées : cas des systémes de grande culture de l'Europe de l'Ouest. Cahiers ORSTOM, Série pédologique, vol. XXII, n° 2, p. 123-131.

Mtimet, A., Attia, R., Derouiche, Ch. et Pontanier, R. (1996) Évaluation des paramètres physico-hydriques de la sensibilité des sols à l'érosion hydrique : référentiel sur l'érodabilité des terres en Tunisie. République Tunisienne, Ministère de l'agriculture, Direction des sols, Tunis, 120 p.

Paul, S. (1990) Télédétection et stéréophotogrammétrie dans les sciences de la terre. Diffusion Doin, Paris, 341 p.

Roose, E. (1993) Innovation dans la conservation et la restauration des sols. Cahiers ORSTOM, Série pédologique, vol. XXVIII, n° 2, p. 147-155.

Roose, E. (1994) Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES). FAO, Bulletin pédologique n° 70, Rome, 420 p.

Roose, E., Arabi, M., Brahamia, K., Chebbani, R., Mazour, M. et Morsli, B. (1993) Érosion en nappe et ruissellement en montagne méditerranéenne algérienne. Réduction des risques érosifs et intensification de la production agricole par la GCES : synthèse des campagnes 1984-1995 sur un réseau de 50 parcelles d'érosion. Cahiers ORSTOM, Série pédologique, vol. XXVIII, n° 2, p. 289-308.

Roose, E., Chebbani, R. et Bourougaa, L. (2000) Ravinement en Algérie. Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Sécheresse, vol 11, n° 4, p. 317-326.

Salamanca Software (1994) Direct from aerial photographs to geographic information systems. PhotoGIS User Guide, Tasmania (Australia), 138 p.

Stocking, M. (1980) Examination of the factors controlling gully growth. *In* De boodt and Gabriels (réd.) Assessment of erosion. John Wiley, New York, p. 505-520.