

RUISSELLEMENT ET ÉROSION EN BIOCLIMAT MÉDITERRANÉEN SEMI-ARIDE DE TUNISIE CENTRALE

par

Jean-Pierre Delhoume
Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer,
Paris

*Abstract. — RUN-OFF AND HYDRIC EROSION IN MEDITERRANEAN SEMI-ARID
BIOCLIMATE*

*The results of a quantitative study of run-off and hydric erosion are presented.
The study was conducted during six years in two experimental stations of Central Tunisia
under mediterranean semi-arid bioclimate.*

*Résumé. — L'auteur présente les résultats d'une étude quantitative du ruissellement et de
l'érosion hydrique, obtenus durant six années dans deux stations de Tunisie centrale, en
bioclimat méditerranéen semi-aride.*

LE MILIEU. GÉNÉRALITÉS

Les stations sont situées dans le djebel Semmama, au nord de la ville de Kasserine, dans la région naturelle des «Hautes-Steppes» de Tunisie centrale.

Cette région est constituée par un ensemble de chaînons montagneux, dominant un ensemble de glacis et de plaines, façonné durant l'ère Quaternaire.

Les massifs montagneux (1300 à 1544 m) sont des anticlinaux constitués essentiellement par des alternances de calcaires, de marnes et de grès, d'âge crétacé. Ils ont été mis en place au cours de l'orogénèse Plio-Villafranchienne qui a abouti à la surrection des plis et à la mise en place définitive des reliefs, donnant à la Tunisie centrale son aspect actuel.

Dans les piedmonts de ces massifs s'est développé un système de glacis étagés, dont le façonnement s'est effectué au cours des alternances pluviales-interpluviales du

19 FEV. 1996

ORSTOM Fonds Documentaire
N° : 43405 ex 1
Cote : R

Quaternaire, par épandage de matériaux hétérogènes provenant des massifs sur un matériau géologique d'origine continentale (mio-pliocène). Plusieurs phases de carbonatation successives ont permis la formation d'accumulations calcaires compactes, qui grâce à leur dureté, ont été mises en relief de manière relative lors des phases d'érosion.

Les plaines sont des fossés d'effondrement où sont venues s'accumuler des quantités importantes d'alluvions.

Les sols de type calcimorphe sont largement dominants : sols bruns calcaires, rendzines, sols à accumulations calcaires secondaires (croûtes, encroûtement...). Ils sont situés essentiellement dans les reliefs et leurs piedmonts. Les plaines comportent des sols salés à alcalis et des vertisols à caractères de salure. Des sols bruns subtropicaux (bruns steppiques) occupent de faibles étendues, sous végétation naturelle, mais ils se dégradent très rapidement par suite de leur utilisation agricole.

Le climat de cette région est fortement marqué par la continentalité. La pluviométrie moyenne annuelle est de 250 à 300 mm en plaine et piedmont, atteignant 500 mm et plus sur les sommets. Les pluies se caractérisent par leur très grande variabilité inter-annuelle et par leur caractère orageux à fortes intensités surtout au début de l'automne et au printemps.

La moyenne des minima du mois le plus froid (janvier) est de 1,5 à 2°C et celle des maxima du mois le plus chaud (juillet) est de 33 à 37°C.

Les bioclimats de Tunisie centrale appartiennent essentiellement aux étages semi-aride et aride.

Les différents groupements végétaux de Tunisie centrale se répartissent d'une manière générale en fonction du gradient altitudinal :

— Semi-aride supérieur : série du pin d'Alep et du chêne vert avec le groupement à *Pinus halepensis* et *Quercus ilex* (sommets des reliefs) et série du pin d'Alep avec le groupement à *Pinus halepensis* et *Juniperus oxycedrus* (au-dessus de 1000 m d'altitude).

— Semi-aride inférieur : série de pin d'Alep avec le groupement à *Pinus halepensis* et *Thymelaea tartonraira* et groupement à *Pinus halepensis* et *Juniperus phoenicea* (de 750 à 1100 m environ), avec nombreux faciès de dégradation à *Rosmarinus officinalis*, *Cistus libanotis*, *Thymus algeriensis*...

— Aride supérieur : au-dessous de 750 à 800 m d'altitude, formations steppiques dominées par l'alfa (*Stipa tenacissima*) et dans les zones de culture par l'armoise blanche (*Artemisia herba-alba*) et par l'armoise champêtre (*Artemisia campestris*).

Très anciennement occupée par l'homme, la Tunisie centrale comporte une population essentiellement rurale dont l'impact sur le milieu est très important. La pression démographique et surtout le développement de la culture mécanisée ont favorisé l'extension du domaine agricole aux dépens du domaine forestier et de la steppe, zones de parcours

traditionnels du bétail. Il en résulte une dégradation et une disparition de la végétation naturelle qui favorisent l'érosion des sols.

MÉTHODOLOGIE. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Dans les deux stations d'étude, le dispositif expérimental utilisé est celui des parcelles d'érosion, mais que nous avons adaptées aux deux types de milieu étudié.

STATION EN ZONE MONTAGNEUSE

Elle est située sur un versant structural à 1000 m d'altitude avec une végétation forestière caractéristique des massifs montagneux de Tunisie centrale. Dans un tel milieu, les processus de ruissellement et d'érosion hydrique sont conditionnés par la couverture végétale (densité, structure...). Pour étudier cette influence, deux parcelles ont été installées qui diffèrent uniquement par la densité et la structure de la végétation, tous les autres paramètres étant semblables (pente, sol, dimensions) (fig. 1).

L'une des parcelles (parcelle boisée – PB) possède une végétation forestière arbustive (1 à 4 m de hauteur) à base de *Pinus halepensis* avec une strasse basse (0 à 50 cm) à *Rosmarinus officinalis* et *Cistus libanotis*, le recouvrement global étant de 70 %. L'autre parcelle (parcelle garrigue – PG) possède une végétation basse (0 à 50 cm) du type garrigue, très ouverte, à recouvrement global de 32 %, avec *Rosmarinus officinalis*, *Cistus libanotis*, *Globularia alypum*, *Stipa tenacissima*...

Chacune des deux parcelles, orientée selon la ligne de plus grande pente, a 22 m de longueur sur 6 m de largeur, avec une pente de 9 %. Le sol est du type brun calcaire peu épais, sur roche mère calcaire, avec une forte proportion de graviers et cailloux en surface.

STATION EN ZONE DE PIEDMONT

Cette station, à 675 m d'altitude, est située dans un milieu très dégradé, qui est constitué par un système de glacis quaternaires étagés, plus ou moins disséqués par l'érosion hybride et subsistant sous forme de buttes-témoins et de lanières s'étirant vers l'aval (fig. 2). C'est perpendiculairement à l'axe longitudinal de l'un de ces glacis, le long d'un versant de raccordement entre les niveaux Quaternaire moyen et récent, que nous avons installé deux parcelles :

- l'une dite «parcelle-toposéquence» (PT) occupe tout le versant sur 150 m de longueur à partir de la ligne de crête du niveau Quaternaire moyen ;
- l'autre, dite «parcelle-amont» (PA), occupe l'amont du versant, là où la pente est la plus forte.

Un tel dispositif permet d'étudier les processus de ruissellement et d'érosion se produisant le long du versant, sur 150 m de longueur, depuis leur genèse à l'amont, tout en précisant l'influence de la zone amont du versant.

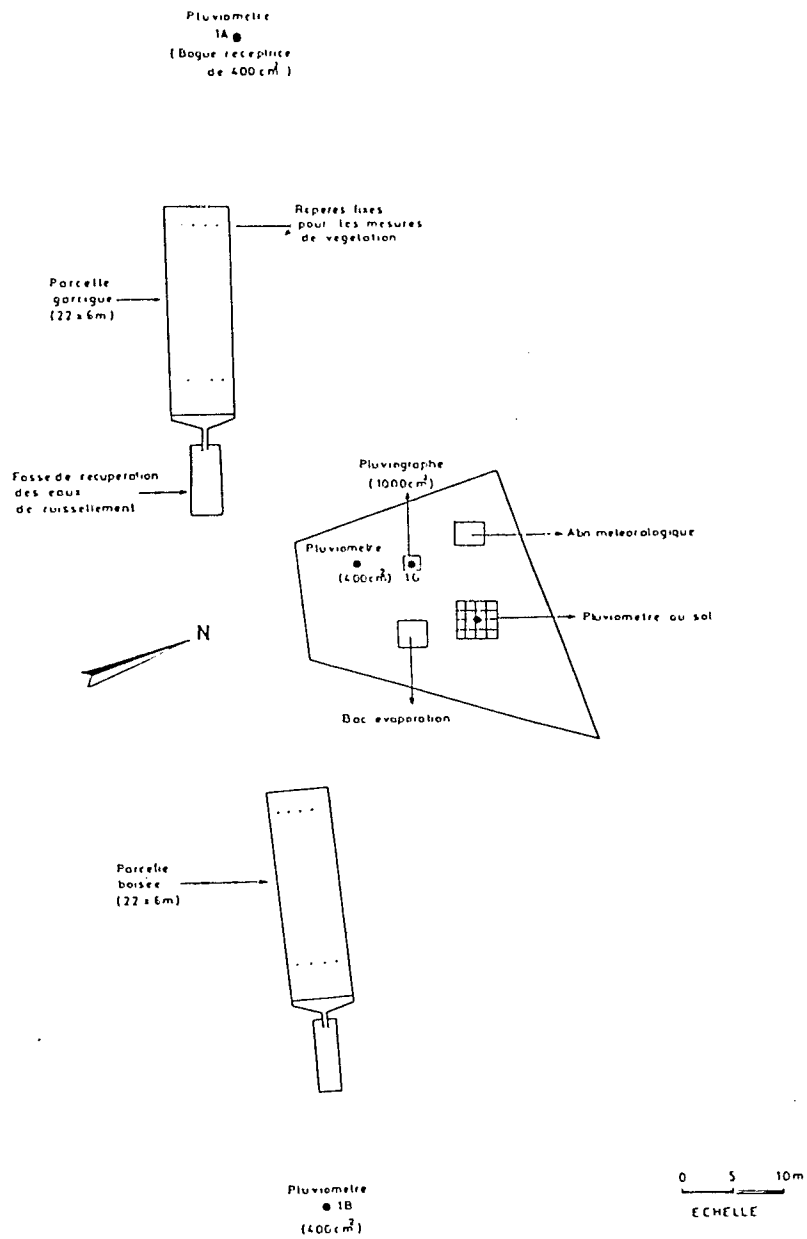


Fig. 1. — Plan de la station en zone montagneuse.
Fig. 1. — Plan of the station situated in mountainous area.

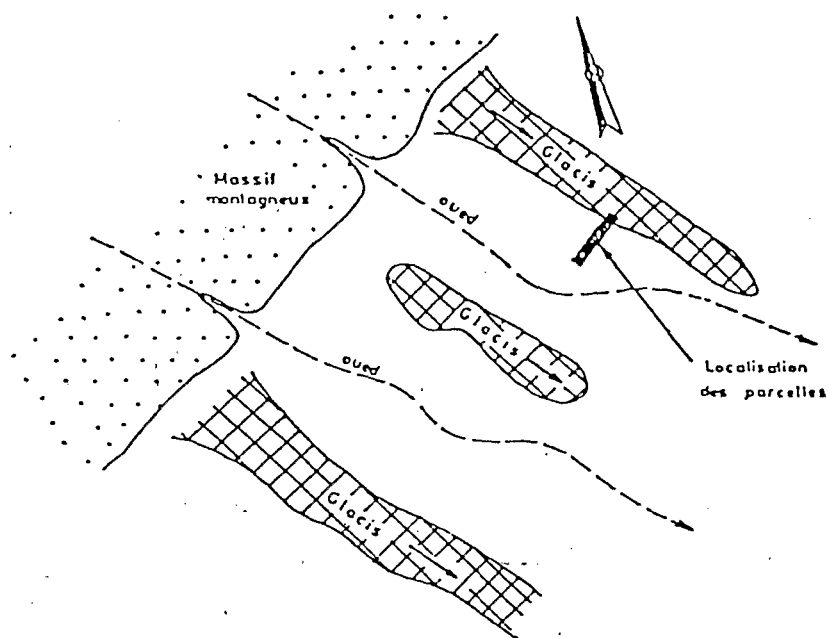


Fig. 2. — Localisation de la station en zone de piedmont.
 Fig. 2. — Location of the station situated in piedmont area.

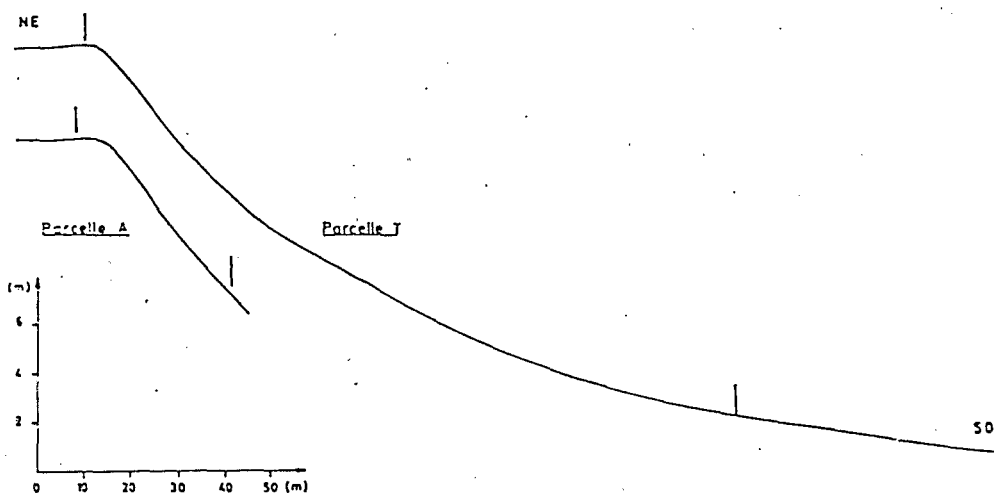
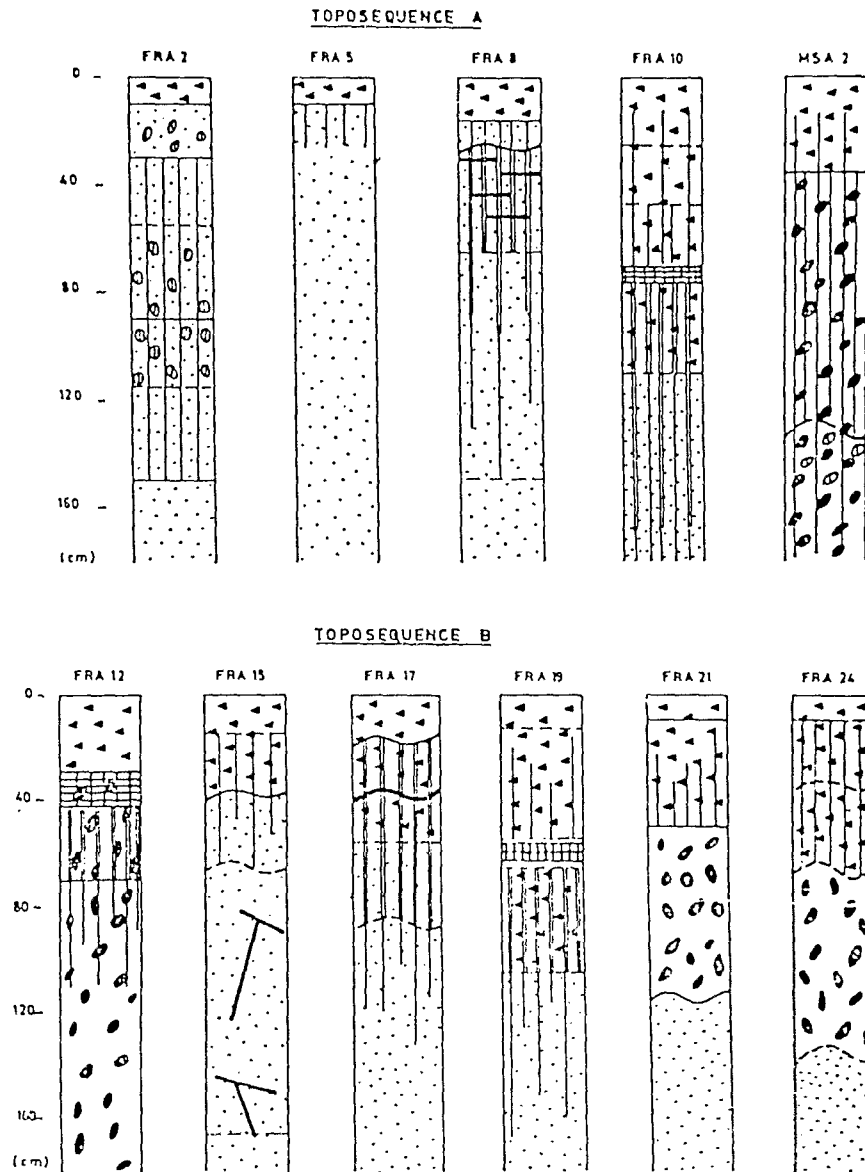






Fig. 3. — Profil topographique longitudinal des deux parcelles de la station en zone de piedmont.
 Fig. 3. — Longitudinal topographic profile of the two plots of the station at the piedmont.

La parcelle-toposéquence (150 x 23 m) a une topographie concave à différentes pentes : 21 % à l'amont, 11,5 % dans la zone médiane et 5 % à l'aval. La parcelle amont (30 x 9 m) présente une pente régulière de 22 % (fig. 3).




Le long du versant, la succession des sols présente des variations dans leur morphologie et leur nature : il s'agit essentiellement de sols à accumulations calcaires secondaires variées, dont nous donnons (fig. 4) la représentation schématique pour deux chaînes de sols situées de part et d'autre de la parcelle-toposéquence.



FORMES D'ACCUMULATIONS DU CALCAIRE SECONDAIRE

- Pellicule rubannée
-  Croûte
-  Encroûtement
-  Accumulation diffuse pseudo-mycélium
-  Amas, lâches

MATERIAUX

-  Colluvions
-  Alluvions
-  Miopliocène sableux (substrat géologique)

TRANSITIONS ENTRE HORIZONS PEDOLOGIQUES

- Nette et régulière
- Distincte et régulière
- ~ Nette et ondulée
- ~ Distincte et ondulée

Fig. 4. — Représentation schématique des sols de l'amont à l'aval (FRA 2 à MSA 2 et FRA 12 à FRA 24) du versant de la station en zone de piedmont.

Fig. 4. — Schematic representation of the soil sequences upstream and downstream (FRA 2 to MSA 2, and FRA 12 to FRA 24) of the slope at the station of mountainous area.

La végétation est une formation basse (0 à 50 cm de hauteur), naturelle, très dégradée, dominée par l'alfa (*Stipa tenacissima*). La couverture végétale n'est pas uniforme le long du versant et d'une manière générale, le taux de recouvrement est voisin de 40 % de 0 à 200 m, avec des zones où il atteint 50 à 60 %. Dans les trente derniers mètres du versant, le taux est inférieur à 10 % par suite de la mise en culture (céréales) de cette zone, où la végétation naturelle a pratiquement disparu.

Les parcelles des deux stations sont limitées par des bordures ne permettant aucun apport d'eau de ruissellement venant de l'extérieur. Leur partie aval est aménagée

Tableau I. — Station zone montagneuse : bilan annuel pluviométrie-ruissellement.
Table I. — Station in the mountainous area : annual balance pluviometry-run-off.

| | 1975 | | 1976 | | 1977 | | 1978 | | 1979 | |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | PG | PB | PG | PB | PG | PB | PG | PB | PG | PB |
| Pluviométrie annuelle (mm) H | 469,6 | | 597,6 | | 318,2 | | 372,0 | | 407,3 | |
| h (mm) | 282,9 | 223,5 | 217,1 | 202,4 | 168,6 | 168,6 | 204,8 | 193,0 | 169,2 | 169,2 |
| K_H (%) | 8,6 | 0,6 | 1,7 | 0,4 | 4,4 | 0,6 | 8,9 | 0,8 | 7,8 | 0,4 |
| K_h (%) | 14,2 | 1,2 | 4,6 | 1,1 | 8,3 | 1,2 | 16,1 | 1,5 | 18,7 | 1,1 |
| N | 71 | | 116 | | 62 | | 57 | | 67 | |
| N_R | 16 | 13 | 18 | 16 | 10 | 10 | 12 | 11 | 11 | 11 |

h = hauteur de pluie des séquences pour lesquelles s'est produit un ruissellement.

K = coefficient de ruissellement annuel par rapport à *H* (K_H) et à *h* (K_h).

N = nombre annuel de séquences pluvieuses et nombre annuel de séquences pour lesquelles s'est produit un ruissellement (N_R).

Tableau II. — Station montagneuse : comparaison des coefficients de ruissellements (en %) des deux parcelles au niveau de la séquence pluvieuse.

Table II. — Station in the mountainous area : comparison between the run-off coefficients (in %) over the 2 parcels during the rainy event.

| Séquences | 75.3 | 75.7 | 75.8 | 75.13 | 75.16 | 76.9 | 76.13 | 77.4 | 77.6 | 77.9 | 78.7 | 78.9 | 79.4 |
|-------------|------|------|------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| P. garrigue | 0,3 | 22,1 | 21,7 | 38,7 | 6,9 | 8,7 | 14,2 | 21,2 | 4,9 | 17,6 | 55,6 | 21,1 | 16,7 |
| P. boisée | 0 | 2,2 | 2,4 | 2,4 | 1,6 | 1,3 | 2,0 | 2,8 | 2,0 | 2,0 | 3,2 | 1,6 | 1,1 |

de manière à recueillir la totalité du ruissellement superficiel se produisant dans les parcelles, ainsi que les terres érodées.

Le dispositif est complété en zone montagneuse et en zone de piedmont, par une station météorologique, avec un réseau de pluviomètres et de pluviographes.

RÉSULTATS. INTERPRÉTATIONS

STATION EN ZONE MONTAGNEUSE

Dans celle-ci est étudié le rôle de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion hydrique. Il s'agit d'une étude comparative entre deux parcelles (parcelle boisée et parcelle garrigue).

Le ruissellement superficiel : processus primaire permettant le déplacement d'éléments dissous (érosion chimique) et d'éléments solides (érosion mécanique)

Le bilan annuel pluviométrie-ruissellement (tab. I) montre qu'il existe un faible nombre (N) de séquences pluvieuses pour lesquelles s'est produit un ruissellement : de 15 à 22 % du nombre annuel, ce qui représente cependant de 35 à 60 % de la hauteur de pluie annuelle.

Les coefficients de ruissellement annuel (K_H) laissent apparaître une différence de comportement des deux parcelles, mais qui reste cependant peu importante : de 0,4 à 0,8 % en parcelle boisée pour 1,7 à 8,9 % en parcelle garrigue.

Ceci est dû essentiellement au grand nombre de pluies ne provoquant aucun ruissellement, qui masquent la différence de réaction des deux parcelles vis-à-vis du ruissellement. Cette différence est mise en évidence de manière très nette si l'on compare les ruissellements de chaque parcelle par séquence pluvieuse (tabl. II). Nous constatons que si pour la parcelle boisée le coefficient de ruissellement a varié de 0 à 3,2 %, dans la parcelle garrigue il a varié beaucoup plus pour les pluies équivalentes : de 0,3 à 55,6 %.

Si des coefficients semblables dans une parcelle correspondent à des coefficients voisins pour l'autre (séquences 75.7 et 75.8 par exemple), il n'en est pas toujours ainsi et à un coefficient donné dans une parcelle peuvent correspondre des coefficients très variables dans l'autre : séquences 75.8 et 75.13, 76.13 et 77.6, 77.4 et 78.9...

Pour expliquer ces variations, d'apparence contradictoire, dans le comportement des deux parcelles, il est nécessaire d'étudier l'influence respective des différents facteurs conditionnant le ruissellement : couvert végétal, caractéristiques de la pluie, humidité préalable du sol.

INFLUENCE DU COUVERT VÉGÉTAL

Une première estimation du rôle de la couverture végétale sur le ruissellement nous est fournie par les comparaisons des coefficients de ruissellement ci-dessus entre les

deux parcelles. Alors que celui de la parcelle boisée apparaît comme « borné » à une valeur maximum voisine de 3 % (tout au moins dans la gamme des pluies étudiées), celui de la parcelle garrigue atteint 55 %. Mais il n'est pas nécessaire que la végétation soit du type arbustif à taux de recouvrement élevé comme celui de la parcelle boisée, pour réduire dans des proportions notables le ruissellement, comme le montrent les exemples ci-dessous (tabl. III).

Tableau III. — Station zone montagneuse : caractéristiques de quelques séquences de la parcelle garrigue.

Table III. — Station in the mountainous area : characteristics of some rainy events over the garrigue plot.

| Séquences | H (mm) | IM30 (mm/h) | K (%) | h ₁ | h ₂ | h ₅ | h ₁₀ |
|---------------------|--------|----------------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 75.7 (11 mai 75) | 12,5 | 24,0 | 22,1 | 1,3 | 1,3 | 7,6 | 11,1 |
| 76.10 (17 juil. 76) | 11,3 | 24,6 | 4,9 | 0 | 0 | 1,1 | 1,1 |
| 75.11 (23 août 75) | 19,0 | 19,0 | 16,9 | 3,0 | 3,1 | 3,1 | 21,7 |
| 76.6 (25 juin 76) | 14,0 | 24,2 | 5,7 | 12,4 | 12,4 | 14,7 | 15,3 |

H = hauteur de pluie de la séquence (en mm).

IM30 = intensité maximale de la pluie durant 30 m consécutives (exprimée en mm/heure).

K = coefficient de ruissellement.

*h*₁, *h*₂, ... = hauteur de pluie cumulée (en mm) dans les 24 heures, 48 heures, 5 jours et 10 jours précédant le ruissellement.

En effet, ceux-ci indiquent que pour des couples de séquences pluvieuses semblables dans leurs caractéristiques, le ruissellement peut être différent dans la parcelle garrigue. Cette variation s'explique par l'augmentation notable du taux de recouvrement de la végétation dans cette dernière parcelle, de début 1975 à août 1976, période durant laquelle les deux parcelles ont été mises en défens. D'avril 1975 à août 1976, ce taux de recouvrement est passé de 32,4 à 42 % dans la parcelle garrigue, alors que dans le même temps il a très peu augmenté dans la parcelle boisée : de 69,5 à 70,3 %. En indice de bio-volume végétal aérien¹, l'accroissement a été de 100 à 243 d'avril 1975 à août 1976 en parcelle garrigue et de 486 à 611 en parcelle boisée.

De l'ensemble des résultats obtenus et pour une certaine « gamme de pluie », nous avons pu établir une relation entre le coefficient de ruissellement (pour des parcelles du type de celles utilisées) et le taux de recouvrement végétal (fig. 5). Nous constatons que pour ce dernier, un taux voisin de 40 % est une valeur critique au-dessous de laquelle le ruissellement augmente très rapidement.

Une végétation basse et dégradée, du type garrigue, peut être suffisante pour réduire le ruissellement, à condition qu'elle atteigne un taux de recouvrement suffisant.

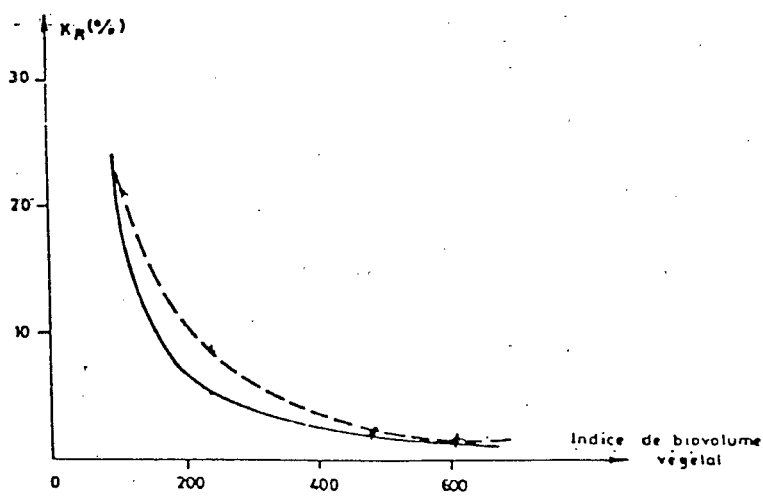
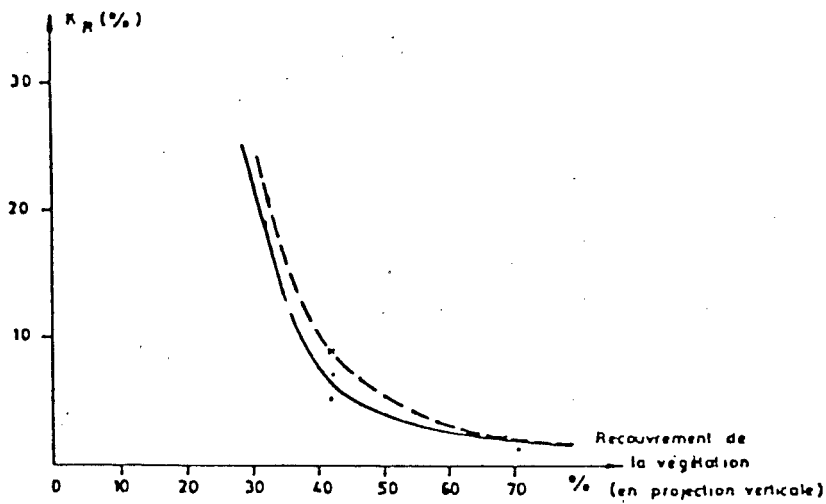


Fig. 5. — Évolution du taux de ruissellement en fonction de la couverture végétale en zone montagneuse.

----- pour une pluie de 20 mm ($IM_{30} = 24$ mm/h ; sur sol sec).

— pour une pluie de 12 mm ($IM_{30} = 35$ mm/h ; sur un sol très peu humide).

⇒ Fig. 5. — Trend of run-off rate related to the vegetal cover in the mountainous area.

INFLUENCE DES CARACTÉRISTIQUES DE LA PLUIE

Ce n'est pas la hauteur de pluie qui détermine l'intensité du ruissellement, mais essentiellement «l'agressivité» de cette pluie, que nous avons caractérisée ici par son intensité maximale durant 30 minutes consécutives ou hauteur d'eau précipitée durant cette période (exprimée en millimètres par heure).

Les exemples du tableau IV mettent en évidence l'importance de cette «agressivité» de la pluie et ce sont les plus fortes intensités qui ont provoqué, d'une part les ruissellements les plus importants et, d'autre part, comme nous le verrons ci-dessous, l'érosion la plus forte.

Cette agressivité est une des caractéristiques des pluies en Tunisie centrale, qui peuvent être brutales avec de très fortes intensités. Mais il s'agit d'une caractéristique très aléatoire et au cours des cinq années d'observation en zone montagneuse, sur les 370 séquences pluvieuses, seules 4 ou 5 peuvent être qualifiées d'agressives.

Tableau IV. — Station zone montagneuse : caractéristiques de quelques séquences pluvieuses et ruissellement en parcelle garrigue.

Table IV. — Station in the mountainous area : characteristics of some rainfall and run-off sequences over the garrigue plot.

| Séquences | H (mm) | K (%) | IM30 (mm/h) |
|-----------|--------|-------|-------------|
| 75.5 | 39,5 | 2,9 | 8,4 |
| 78.7 | 39,3 | 55,6 | 50,8 |
| 75.13 | 20,6 | 38,7 | 41,0 |
| 77.1 | 21,9 | 0,3 | 4,0 |
| 75.7 | 12,5 | 22,1 | 24,0 |
| 76.5 | 12,4 | 1,3 | 13,8 |

INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ PRÉALABLE DU SOL

N'ayant pas effectué de déterminations périodiques de l'humidité du sol dans les parcelles, nous utiliserons, pour étudier l'influence de l'humidité préalable sur les processus de ruissellement, des indices correspondant aux hauteurs de pluie cumulées ayant eu lieu dans les jours antérieurs à la séquence pluvieuse concernée.

Ainsi (tabl. V), les séquences 75.14 et 78.4 par exemple, identiques dans leurs caractéristiques, ont provoqué des ruissellements différents, respectivement de 11,6 et 2,2 %, ce qui s'explique par une différence de l'état hydrique du sol lorsqu'il reçoit la pluie.

Pour des séquences plus importantes (75.13 et 78.9), mais semblables, l'humidité préalable du sol apparaît là aussi comme un facteur important conditionnant le ruissellement.

Tableau V. — Station en zone montagneuse : rôle de l'humidité préalable du sol sur le ruissellement en parcelle garrigue.

Table V. — Station in the mountainous area : effect of the previous humidity of the soil on run-off over the garrigue plot.

| Séquences | H (mm) | IM30(mm/h) | K (%) | h ₁ | h ₂ | h ₅ | h ₁₀ |
|-----------|--------|------------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 75.14 | 9,6 | 12,2 | 11,6 | 20,6 | 44,9 | 44,9 | 46,6 |
| 78.4 | 9,8 | 13,0 | 2,2 | 0 | 0 | 0,3 | 0,3 |
| 75.13 | 20,6 | 41,0 | 38,7 | 24,3 | 24,3 | 24,3 | 26,0 |
| 78.9 | 19,0 | 35,0 | 21,1 | 0 | 0 | 0 | 5,2 |
| 77.10 | 6,6 | 12,0 | 15,3 | 38,9 | 38,9 | 44,9 | 44,9 |
| 75.9 | 5,5 | 12,0 | 1,1 | 0 | 0 | 2,4 | 2,4 |
| 78.10 | 10,5 | 23,8 | 6,0 | 0 | 0 | 20,0 | 20,0 |

h₁, h₂,... = hauteur de pluie cumulée (en mm) dans les 24 h, 48 h, 5 et 10 jours précédant le ruissellement.

Des pluies de faible hauteur et peu agressives peuvent provoquer des ruissellements notables lorsqu'elles tombent sur un sol humide : c'est le cas de la séquence 77.10 comparée à la séquence 75.9 se produisant sur un sol sec.

L'état hydrique du sol joue un rôle secondaire lorsque le ruissellement se produit après une période de quelques jours sans pluie : la séquence 78.10 ne donne lieu qu'à un ruissellement de 6 % qui peut paraître faible si nous la comparons à la séquence 75.14, qui, bien que moins agressive, provoque un ruissellement double (11,6 %). Mais pour ce dernier, il s'est produit des pluies dans les 48 heures antérieures, alors que pour la séquence 78.10, durant cette période, le sol n'a reçu aucune pluie.

L'érosion hydrique

Si pour chaque ruissellement il y a eu érosion chimique, ce n'est pas le cas pour l'érosion mécanique, car sur les 67 séquences pluvieuses ayant donné lieu à un ruissellement, 24 ont été des pluies «érosives mécaniquement» dans la parcelle garrigue et seulement 6 dans la parcelle boisée.

Le bilan annuel de l'érosion mécanique (tabl. VI) accentue la différence entre les deux parcelles : alors que l'érosion moyenne annuelle (calculée sur les cinq années d'observation) de la parcelle garrigue a été de 308 kg/ha², elle n'a atteint que 6,4 kg/ha dans la parcelle boisée.

De 1975 à 1976, nous constatons, en parcelle garrigue, une diminution de l'érosion mécanique, à mettre en relation avec l'augmentation du taux de recouvrement végétal, comme nous l'avons vu ci-dessus. De 1978 à 1979, l'érosion a augmenté fortement, par suite de la diminution du taux de recouvrement de la végétation, suite à la coupe de celle-ci, effectuée à la fin de l'année 1977.

Pour la parcelle boisée, par contre, l'érosion mécanique est restée très faible, même nulle pour les deux dernières années et la couverture végétale est largement suffisante pour limiter et même supprimer aussi bien le ruissellement que l'érosion.

Tableau VI. — Station en zone montagneuse : bilan annuel de l'érosion mécanique (en kg/ha).

Table VI. — Station in the mountainous areas : annual budget of mechanical erosion (in kg/ha).

| | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | Total 1975 à 1979 | Moyenne annuelle |
|-------------|------|------|------|------|------|----------------------|---------------------|
| P. garrigue | 118 | 20 | 30 | 334 | 1038 | 1540 | 308 |
| P. boisée | 7 | 20 | 5 | 0 | 0 | 32 | 6,4 |

Cependant, les quantités de terre érodée sont restées, même pour la parcelle garrigue, relativement faibles, ce que nous attribuons, essentiellement, à l'état de surface du sol dans cette parcelle, qui est recouverte par 57 % d'éléments grossiers et 16 % de litière, pour 27 % de sol nu. Cette couverture de graviers et cailloux protège le sol nu de l'impact et de l'énergie cinétique (effet splash) des gouttes de pluie, ce qui limite l'érosion mécanique.

Il faut noter que la majeure partie de l'érosion mécanique dans la parcelle garrigue est due à 5 séquences pluvieuses (tabl. VII). Celles-ci, qui représentent 5,5 % de la pluviométrie totale des cinq années d'observation, ont provoqué près de 70 % de l'érosion mesurée durant cette période.

Tableau VII. — Station en zone montagneuse : séquences érosives dans la parcelle garrigue.

Table VII. — Station in the mountainous area : sequences of erosion over the garrigue plot.

| Séquences | H (mm) | IM30 (mm/h) | Erosion (kg/ha) |
|-----------|--------|-------------|-----------------|
| 78.7 | 39,3 | 50,8 | 272 |
| 79.6 | 28,9 | 50,0 | 197 |
| 79.8 | 20,7 | 26,6 | |
| 79.9 | 19,7 | 36,4 | 591 |
| 79.10 | 11,8 | 20,8 | |

Apparaît ainsi la notion «d'événement pluviométrique», susceptible de provoquer une érosion notable laissant des «marques» dans le paysage, mais là aussi, ce type d'événement est très aléatoire.

L'érosion chimique

Elle a lieu dès que le ruissellement s'organise car, dès leur contact avec le sol, les eaux se chargent en éléments dissous.

D'une manière générale, les eaux de ruissellement dans les deux parcelles présentent un faciès bicarbonaté calcique avec une forte prédominance d'ions calcium et bicarbonate.

Les eaux de la parcelle boisée sont légèrement plus chargées que celles de la parcelle garrigue, ce qui est dû à une matière organique plus abondante dans la parcelle boisée, favorisant des dissolutions plus fortes du calcaire sous l'influence du gaz carbonique.

L'érosion chimique a été évaluée à 43 kg/ha/an, en parcelle garrigue et à 4 kg/ha/an en parcelle boisée (moyenne des cinq années de mesures).

Le bilan global de l'érosion hydrique

Pour les deux types de milieux étudiés, il est très contrasté = 351 kg/ha/an pour la parcelle garrigue, 10,4 kg/ha/an pour la parcelle boisée. Dans cette dernière, l'érosion apparaît donc comme négligeable. Dans la parcelle garrigue par contre, la valeur ci-dessus doit être nuancée, car selon le taux de recouvrement végétal de cette parcelle, l'érosion mécanique mesurée a varié de 20 à 1038 kg/ha/an.

Cette dernière valeur nous paraît plus significative pour les milieux à végétation dégradée et beaucoup plus en «accord» avec le paysage tel que l'on peut l'observer, fortement marqué par l'érosion hydrique.

STATION EN ZONE DE PIEDMONT

Dans cette station, localisée à 8 km au sud-est de la précédente, nous étudions le ruissellement et l'érosion le long d'un versant, avec d'une part, une parcelle installée à l'amont de celui-ci sur 30 mètres de longueur (pente 22 %), d'autre part, une parcelle implantée sur l'ensemble du versant sur 150 mètres de longueur (pente variable = 21 % à l'amont, 11,5 % dans la zone médiane et 5 % à l'aval).

Il ne s'agit plus ici d'une étude comparative entre deux parcelles, mais d'une étude de la dynamique des processus de ruissellement et d'érosion le long d'un versant, en fonction de sa longueur et de sa pente.

Le ruissellement superficiel

Malgré la faible distance entre les deux stations, la pluviométrie en zone de piedmont ne représente que 60 à 70 % de celle de la zone montagneuse, ce qui s'explique essentiellement par la différence d'altitude (325 m) entre les deux stations.

Le nombre de séquences pluvieuses génératrices de ruissellement est très faible : de 2 % à 15 % du nombre annuel, représentant de 6 à 30 % de la hauteur de pluie annuelle,

sauf en 1981 où elles atteignent 43 % (tabl. VIII). Par rapport à la zone montagneuse, il y a en piedmont, *une proportion beaucoup plus faible* de séquences pluvieuses provoquant un ruissellement.

Les coefficients de ruissellement annuels (K_H) varient, dans la zone amont du versant à forte pente, de 0,2 à 14,6 % et de 0 à 9,1 % pour l'ensemble du versant.

Tableau VIII. – Station en zone de piedmont : bilan annuel pluviométrie/ruissellement.
Table VIII. – Station in the piedmont : annual balance rainfall/run-off.

| | 1976 | | 1977 | | 1978 | | 1979 | | 1980 | | 1981 | |
|-----------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | PA | PT | PA | PT | PA | PT | PA | PT | PA | PT | PA | PT |
| H (mm) | 425,7 | | 196,4 | | 220,4 | | 290,0 | | 276,6 | | 210,0 | |
| h (mm) | 114,1 | 117,1 | 12,6 | 12,7 | 26,3 | 26,7 | 82,9 | 83,7 | 33,6 | 33,4 | 90,1 | 89,6 |
| K_H (%) | 5,1 | 0,9 | 0,2 | 0,05 | 2,8 | 1,5 | 4,4 | 1,8 | 3,4 | 1,4 | 14,6 | 9,1 |
| K_h (%) | 19,1 | 3,4 | 3,6 | 0,9 | 23,4 | 12,3 | 15,5 | 6,2 | 28,0 | 11,3 | 34,1 | 21,2 |
| N | 82 | | 45 | | 38 | | 59 | | 42 | | 47 | |
| N_R | 6 | 5 | 1 | | 2 | | 9 | 8 | 1 | | 5 | |

H = pluviométrie annuelle

h = hauteur de pluie des séquences pour lesquelles s'est produit un ruissellement

K = coefficient de ruissellement annuel par rapport à H (K_H) et à h (K_h)

N = nombre annuel de séquences pluvieuses et nombre annuel de séquences pour lesquelles s'est produit un ruissellement (N_R)

PA = amont du versant

PT = totalité du versant

A l'échelle de la séquence pluvieuse (tabl. IX), les coefficients de ruissellement sont beaucoup plus contrastés et ceux de la zone amont sont toujours supérieurs à ceux de l'ensemble du versant : alors que pour les 30 mètres de l'amont du versant le ruissellement a varié de 3,6 à 48,7 %, pour les 150 m du versant, il a varié de 0 à 29,8 %.

Pour deux séquences (76.6 et 79.1), il n'y a pas eu de ruissellement à l'aval du versant, alors qu'il s'en est produit un dans la zone amont. Il y a ainsi infiltration des eaux de ruissellement le long du versant, plus ou moins loin vers l'aval, phénomène qui peut être accentué selon l'état de la surface du sol dans la zone aval du versant, comme le montrent les séquences 76.4 et 81.2. Celles-ci ont provoqué un ruissellement semblable à l'amont (48,7 et 46,9 % respectivement), qui devient très différent à l'aval (5,7 et 28,1 %).

Cet écart s'explique, pour la séquence 76.4 par l'existence de labours récents à l'aval du versant qui ont favorisé l'infiltration des eaux de ruissellement venant de l'amont. Par contre, de tels labours n'existaient pas à l'époque de la séquence 81.2 et la surface du sol se présentait sous forme d'une pellicule durcie, continue et imperméable, très caractéristique en milieux arides, beaucoup plus favorable au ruissellement qu'à l'infiltration.

Tableau IX. — Station en zone de piedmont : comparaison des coefficients de ruissellement (en %) au niveau de la séquence pluvieuse.

Table IX. — Station in the piedmont area : comparison between run-off coefficients (%) in regard with the rainfall sequence.

| Séquences | 76.2 | 76.4 | 76.6 | 77.1 | 78.1 | 79.1 | 79.5 | 79.8 | 81.2 | 81.3 | 81.4 | 81.5 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PA (amont) | 4,8 | 48,7 | 3,9 | 3,6 | 25,6 | 12,6 | 18,5 | 24,5 | 46,9 | 42,7 | 21,9 | 18,3 |
| PT (versant) | 3,7 | 5,7 | 0 | 0,9 | 16,5 | 0 | 3,6 | 19,8 | 28,1 | 29,8 | 7,6 | 12,3 |

Dans la zone amont du versant, le ruissellement dépend essentiellement de l'agressivité de la pluie, d'autant plus que la pente est forte, et il existe une relation-quasi-linéaire entre l'intensité maximale de la pluie durant 30 minutes et le coefficient de ruissellement.

Dans cette zone amont du versant, par suite d'un taux de recouvrement insuffisant, inférieur à 40 %, la couverture végétale ne joue pas un rôle «réducteur» du ruissellement, comme nous l'avons observé en zone montagneuse.

Tout au plus peut-on noter une influence de l'humidité préalable du sol, comme le montrent les séquences 79.3 et 79.7. Celles-ci, pourtant de faible hauteur (5,2 et 6,8 mm) et d'intensité maximale en 30 minutes peu importante (11,5 et 10,0 mm/heure), ont provoqué un ruissellement respectivement de 22,8 et 11,5 %, qui s'est produit sur un sol au préalable humide. Des pluies semblables dans leurs caractéristiques mais ayant eu lieu sur un sol sec, n'ont provoqué par contre aucun ruissellement.

Pour l'ensemble du versant, le ruissellement est conditionné là aussi, surtout par l'agressivité de la pluie et secondairement par l'état hydrique du sol. Mais, l'état de la surface du sol dans la zone aval du versant et la longueur de ce dernier interviennent, pouvant provoquer soit des infiltrations d'eaux de ruissellement, soit l'augmentation des quantités de matériaux érodés.

L'érosion hydrique

Des 24 séquences pluvieuses ayant donné lieu à un ruissellement à l'amont du versant, 16 ont provoqué une érosion mécanique. Pour l'ensemble du versant, ces chiffres sont respectivement de 22 et de 15. Par rapport à la zone montagneuse, il y a en zone de piedmont une proportion beaucoup plus forte de pluies à la fois «ruissellantes» et «érosives».

L'érosion mécanique est très variable d'une année à l'autre (tabl. X), aussi bien à l'amont que pour l'ensemble du versant. La moyenne annuelle, calculée à partir des six années de mesures, est cinq fois plus forte pour l'amont (938 kg/ha/an) que pour le versant (187 kg/ha/an), ce qui indique qu'une partie importante des terres érodées de l'amont viennent se déposer plus ou moins loin vers l'aval, avant la fin de l'ensemble du versant étudié (150 mètres de longueur).

Tableau X. — Station en zone de piedmont : bilan annuel de l'érosion mécanique (en kg/ha)³.

Table X. — Station in the piedmont area : annual budget of mechanical erosion (kg/ha).

| | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | Total 1976 à 1981 | Moyenne annuelle |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|----------------------|---------------------|
| Amont du versant | 1970 | 0 | 300 | 370 | 187 | 2800 | 5627 | 938 |
| Totalité du versant | 19 | 0 | 173 | 54 | 33 | 841 | 1120 | 187 |

Ceci est cependant différent au niveau de la séquence pluvieuse, et l'érosion mécanique peut être plus forte pour la totalité du versant que pour la zone amont de celui-ci (tabl. XI). Nous constatons en effet que pour certaines séquences, 78.1, 81.2 et 81.3, il y a transit ou exportation de terre érodée plus en aval, en quantité plus forte que celle venant de l'amont du versant.

Tableau XI. — Station en zone piedmont : comparaison de l'érosion mécanique le long du versant (en kg).

Table XI. — Station in piedmont area : comparison about mechanical erosion along the slope (kg).

| Séquences | Amont du versant | Totalité du versant | Dépôt (+) Transit (-) |
|-----------|------------------|---------------------|-----------------------|
| 76.1 | 21,7 | 0,8 | + |
| 76.2 | 12,8 | 0,7 | + |
| 76.3 | 37,8 | 1,1 | + |
| 76.4 | 26,9 | 0,6 | + |
| 76.5 | 46,6 | 3,1 | + |
| 78.1 | 9,0 | 53,5 | - |
| 79.1 | 3,2 | 0 | + |
| 79.5 à 8 | 19,0 | 16,0 | + |
| 79.9 | 5,2 | 2,0 | + |
| 80.1 | 13,8 | 10,9 | + |
| 81.2 | 86,4 | 151,0 | - |
| 81.3 | 121,0 | 129,0 | - |

Nous assistons ainsi à une alternance de périodes au cours desquelles il y a globalement soit dépôt le long du versant, soit exportation au-delà des 150 mètres de longueur de versant, de terre érodée.

Dans ce dernier cas, les pluies correspondantes sont parmi les plus agressives, avec des intensités maximales durant 30 minutes supérieures à 45 mm/heure et avec une hauteur d'eau précipitée supérieure à 20 mm.

L'amont du versant subit donc une érosion mécanique irréversible, n'étant pas compensée par l'apport d'autres éléments. Ces matériaux érodés viennent s'accumuler vers l'aval, mais ces dépôts ne sont pas stabilisés et lors d'épisodes érosifs postérieurs ils sont repris et entraînés encore plus vers l'aval.

Cette dynamique, progressivement, provoque l'appauvrissement des sols du versant et en particulier dans la partie inférieure de celui-ci, où sont localisées les zones de culture.

Les eaux de ruissellement présentent le même faciès bicarbonaté-calcique que celles de la zone montagneuse et l'érosion chimique reste faible et négligeable par rapport à l'érosion mécanique : 20 kg/ha/an à l'amont et 8,8 kg/ha/an pour l'ensemble du versant.

CONCLUSIONS

Les résultats présentés ci-dessus ne s'appliquent qu'à un milieu donné et à des conditions expérimentales particulières, mais ils permettent de déterminer et de caractériser ruissellement et érosion hydrique en bioclimat méditerranéen semi-aride du centre de la Tunisie.

D'une manière générale, en zone montagneuse, avec une pluviométrie « normale », l'érosion reste limitée. Par contre, le ruissellement peut être important et, en s'accumulant dans le piedmont et la plaine, provoquer une érosion linéaire grave. Pour protéger ces zones, il y a deux possibilités. La première consiste en une mise en défens réelle du milieu, qui permettrait, dans ce milieu forestier encore peu dégradé, une augmentation du bio-volume végétal aérien jusqu'à une valeur critique à partir de laquelle la protection du sol vis-à-vis du ruissellement et de l'érosion est suffisante. Une telle mise en défens pourrait d'ailleurs être « aménagée » et organisée avec des rotations par exemple.

La seconde possibilité consiste en un aménagement des oueds du secteur montagneux de manière à limiter les apports d'eaux de ruissellement vers l'aval, ces apports d'eaux pouvant être stockés dans le piedmont où est concentrée la population, dans l'optique de leur utilisation à des fins agricoles.

Dans la zone de piedmont, la couverture végétale est très dégradée et n'est plus suffisante pour assurer la protection du sol. Un aménagement simple de ce secteur permettrait à la fois de réduire ruissellement et érosion, mais aussi d'utiliser les eaux de ruissellement. Il consisterait en la réalisation de banquettes ou levées de terre en courbes de niveaux, au bas de l'amont du versant à forte pente, avec localement des bassins de stockage des eaux permettant leur utilisation dans la zone plus en aval, où sont localisées les cultures, essentiellement durant les périodes critiques de sécheresse.

Mais, aussi bien dans le secteur montagneux que dans le piedmont, peuvent se produire des événements pluviométriques exceptionnels et imprévisibles, générateurs d'érosion catastrophique.

NOTES

- 1 – Méthode du sondage systématique par points-quadrats le long d'une ligne (Brown, 1954 ; Daget, Poissonet, 1969-1971) ; base 100 pour la première mesure dans la parcelle garrigue.
- 2 – Nous avons rapporté à l'hectare les quantités de terre érodée, mais il ne faut pas oublier que les phénomènes mesurés se sont produits sur une longueur de 22 mètres, dans une parcelle de 132 m².
- 3 – Les valeurs de l'érosion sont rapportées à l'hectare, mais les phénomènes mesurés se sont produits sur une longueur de 30 m pour une superficie de 300 m² à l'amont du versant, et respectivement sur 150 m et 3330 m² pour l'ensemble de celui-ci.

BIBLIOGRAPHIE

- Brown, D., 1954. – *Methods of surveying and measuring vegetation*, Bull. (42), Com. Agric., Dom. Franham Royal, Bucks, 1 vol., 223 p.
- Carte Phyto-Ecologique de la Tunisie septentrionale - échelle 1/200.000, 1967. – Feuille IV = Maktar-Kairouan – Feuille V = Le Kef-Thala-Fériana. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie*, vol. 40, fasc. 2, notice détaillée, 426 p. cartes et tableaux.
- Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie septentrionale, 1969. – *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie*, Tunis, vol. 42, fasc. 1, 1 vol., texte 235 p., cartes et tableaux.
- Daget, Ph., J. Poissonet, 1969. – *Analyse phytologique des prairies – Applications agronomiques*, CNRS-CEPE, doc. no. 48, 67 p.
- Daget, Ph., J. Poissonet, 1971. – Une méthode d'analyse phytologique des prairies – Critères d'application, *Ann. Agron.*, 22 (1), pp. 5-41.
- Delhoume, J.-P., 1981. – *Études en milieu méditerranéen semi-aride – Ruissellement et Érosion en zone montagneuse de Tunisie centrale (Djebel Semmama) – Résultats 1975 à 1979*, Rapport multigr., Mission ORSTOM, Tunis, 1 vol., 188 p.
- Delhoume, J.-P., 1982. – *Études en milieu méditerranéen semi-aride – Ruissellement et Érosion en zone de piedmont de Tunisie centrale (Djebel Semmama) – Résultats 1976 à 1981*, Rapport multigr., Mission ORSTOM, Tunis, 1 vol. 160 p.
- Le Houérou, H.-N., 1959. – *Recherches écologiques et floristiques sur la végétation de la Tunisie méridionale. Première partie : Les milieux naturels, la végétation*, université d'Alger, Institut de recherches sahariennes, mémoire no. 6, 1 vol. 281 p., bibl. 11 p.
- Le Houérou, H.-N., 1969. – La végétation de la Tunisie steppique, *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie*, vol. 42, fasc. 5, 646 p., annexe 4 (cartes et tableaux).

QUESTION

– *Comment la valeur d'intensité maximale en 30' retenue pour caractériser l'agressivité de la pluie a-t-elle été choisie ?*

A. Godard

Nous avons retenu l'intensité maximale de la pluie en 30' pour caractériser l'agressivité de la pluie afin de pouvoir déterminer «l'index-pluie» R de l'équation de Wischmeier qui s'exprime de la manière suivante :

$$R = E_g \times IM30$$

où E_g est l'énergie cinétique de la pluie et IM30 l'intensité maximale de la pluie durant 30 minutes (exprimée en mm/heure).

Cet «index-pluie» R n'apparaît pas dans le texte ci-dessus, mais nous l'avons utilisé dans les deux rapports où sont consignés l'ensemble des résultats obtenus durant les six années d'étude (voir bibliographie).

J.-P. D.