

L'EROSION HYDRAULIQUE AU MAROC : SON CALCUL ET SON CONTROLE

B. HEUSCH *

SOMMAIRE

- Introduction
- I. Estimation quantitative du transport solide
 - A. Etude du transport solide sur grands bassins versants
 - B. Etude du transport solide sur petits bassins versants
 - 1. Considérations générales
 - 2. Erosion mesurée sur les petits bassins versants du Pré-Rif
 - C. La perte en terre des versants, par ruissellement diffus ou concentré
- II. Contrôle de l'érosion
 - A. Bilan de l'érosion
 - B. Contrôle de l'érosion agricole
 - C. Contrôle de l'érosion globale
- Conclusion

Introduction

Le terme d'érosion hydraulique désigne un ensemble de processus par lesquels deux agents, la pluie et le ruissellement, détachent et transportent les particules terreuses. L'érosion a pour conséquence une exportation de terre qui, si elle n'est pas compensée par une

* Directeur-ingénieur, Station de Recherches Forestières, Rabat.
Al Awamia, 36, pp. 39-63, juillet, 1970.

régénération du sol à partir de la roche-mère sous-jacente, se traduit par un appauvrissement du milieu et une réduction de la production agricole. Mais d'autre part les eaux de percolation entraînent avec elles différentes substances. Un certain rajeunissement du sol par décapage pourrait donc être souhaitable, afin de contrebalancer le phénomène du lessivage, si l'essentiel des éléments fertilisants n'est pas localisé en surface.

Pour maintenir l'érosion entre certaines limites il est nécessaire de pouvoir évaluer avec un minimum de précision l'influence de chacun des facteurs de l'érosion sur ce phénomène. Mais ces différents facteurs - sol, pente, couverture végétale... ne sont pas des variables indépendantes. L'écologie étudie les corrélations partielles qui lient ces différents paramètres entre eux. Il en résulte qu'il est possible de proposer des formules approchées de calcul de l'érosion avec un nombre réduit de variables. Ce sera l'objet de la première partie de cette étude. Afin de pouvoir modifier efficacement le taux d'abrasion, il est nécessaire de disposer de méthodes de contrôle simples, s'appuyant sur une idée précise du mécanisme érosif. Ce sera l'objet de la deuxième partie de l'étude.

I. Estimation quantitative du transport solide

Les valeurs extrêmes se compensant naturellement, la mesure du transport solide sur un fleuve important donne une indication précise sur l'érosion globale moyenne de la région drainée. Grâce aux corrélations naturelles, le nombre de paramètres qu'il est nécessaire de faire intervenir pour expliquer les taux d'abrasion observés décroît lorsque la taille du bassin versant augmente. Nous étudierons donc d'abord l'érosion sur grands bassins.

A. Etude du transport solide sur bassins versants de plus de 500 km²

Nous avons rassemblé sur le tableau 1 l'ensemble des données disponibles au Maroc, en ce qui concerne le transport solide, avec les abréviations suivantes :

S = superficie en km²

P = précipitation moyenne annuelle, en mm/an,

Q_{la} = lame d'eau ruisselée, moyenne annuelle, en mm/an,
transport solide moyen annuel ou érosion globale en mm/an,

Q_{sa} = t/km²/an,

TABLEAU 1

Oued	Station	S	P	Qla	Qsa	T
Sebou	Ain Timedrine	4 429	655	156,2	590	3,76
Moulouya	Mechra Klila	51 500	306	30,5	130	4,26
Sebou	Pont du Mdez	3 474	667	72,6	320	4,36
Sebou	Azib es Soltane	16 276	684	135,6	650	4,85
Sebou	Pont du Sebou	12 985	730	152,2	750	4,90
N'Fiss	Cavagnac	1 707	513	87,4	430	4,91
Sra	Pont du Sker	486	1 391	683,3	3 500	5,15
Aoulaï	Rhafsai	776	1 153	565,3	2 960	5,26
Beht	El Kansera	4 536	541	79,2	450	5,68
Inaouene	Touaba	3 324	831	167,0	1 110	6,68
Ouerrha	Ourtzarh	4 398	1 074	459,3	3 340	7,10
Aoudour	Tafrannt	1 039	1 179	490,2	3 850	7,85
Ouerrha	Mjara	6 183	1 065	441,3	2 460	7,93
Lebène	Tissa	792	836	280,2	2 250	8,06
Ouerrha	Bab Ouender	1 756	966	325,6	3 590	11,03

T = Qsa/Qla = turbidité moyenne de l'eau, en g/l,

R = coefficient de corrélation.

Débits solides mesurés au Maroc, classés par turbidité croissante

L'étude de ce tableau montre que la turbidité moyenne de l'eau varie de 4 g/l pour des bassins peu cultivés, à 11 g/l pour des bassins marneux très érodés, autour d'une médiane de 5 g/l. La quantité de terre érodée est essentiellement fonction de la lame d'eau ruisselée. La corrélation :

$$\log Qsa = 1,16 \log Qla + 0,411 \quad (I)$$

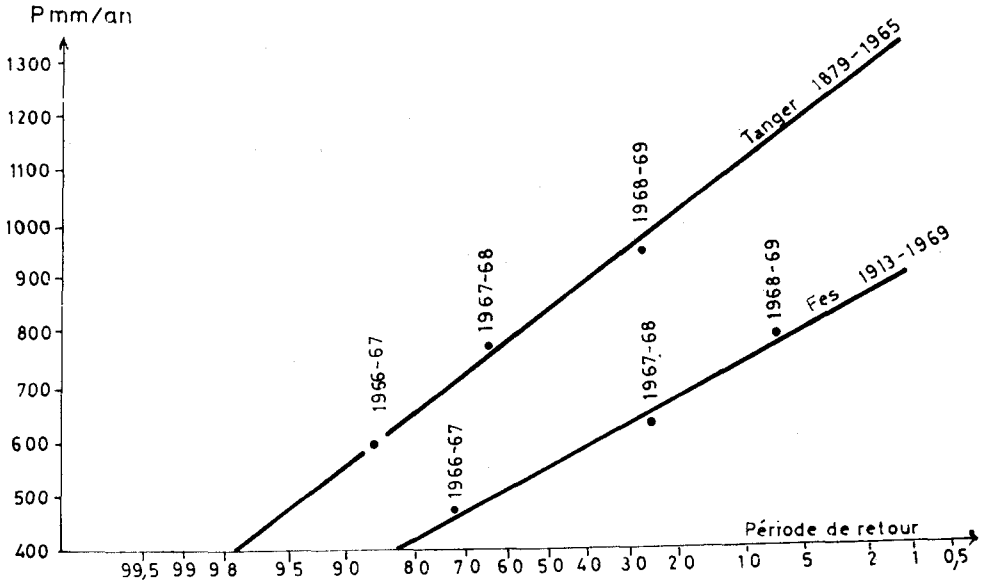
où $Qsa = 2,58 \cdot Qla^{1,16}$ est vérifié avec un coefficient de corrélation

$$R = 0,973$$

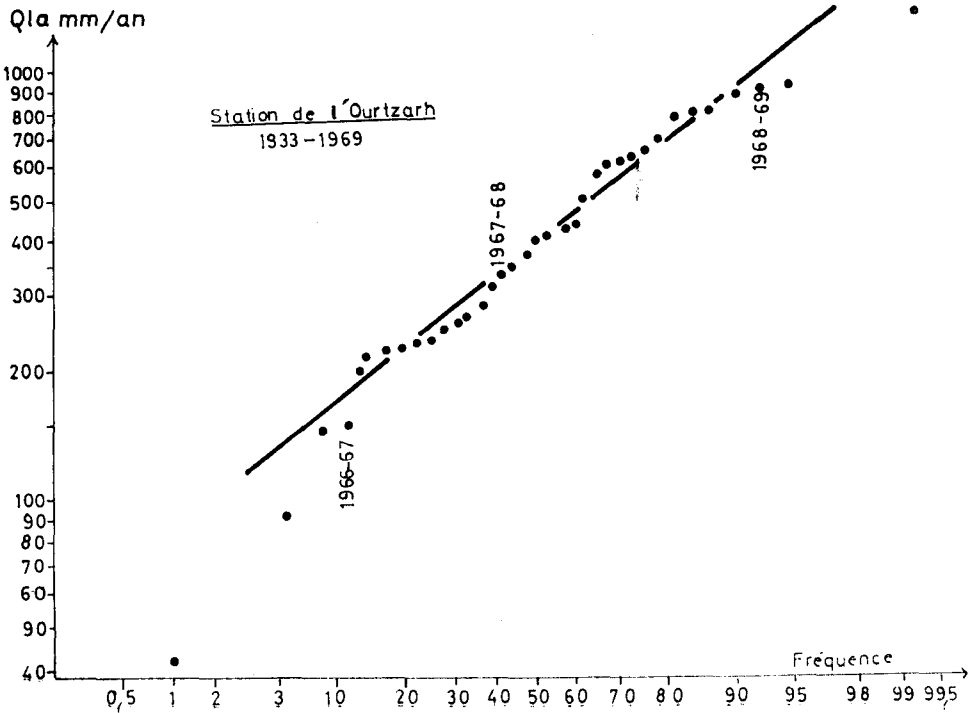
La lame d'eau ruisselée varie en fonction des précipitations ; 4 ajustements statistiques ont été étudiés entre P et Qla avec l'une des 4 hypothèses suivantes :

FIGURE 1

Distribution fréquentielle des précipitations annuelles



Distribution fréquentielle du ruissellement annuel



1. Nous constatons que la distribution fréquentielle des pluies annuelles (année agricole) semble obéir à la loi de Laplace-Gauss ou loi normale, et que le logarithme du débit annuel semble obéir à la même loi (FIGURE 1). Si les événements pluies et les événements débits de même fréquence se produisent au même moment la relation entre P et Q_{la} pourrait être de la forme :

$$P = a \log Q_{la} - b$$

2. Si le coefficient de ruissellement augmente proportionnellement aux précipitations, on aurait $Q_{la}/P = a P - b$
où $Q_{la} = a P^2 - bP$;

3. Si le coefficient de ruissellement est constant on aura :
 $Q_{la} = aP - b$;

4. Le coefficient de ruissellement tend vers une asymptote (voisine de 1) pour une précipitation infinie. L'hyperbole d'équation :
 $Q_{la} = (aP - b)^2 / P$ obéit à cette hypothèse.

Dans les 4 cas le coefficient b doit être négatif car il faut une certaine quantité d'eau pour amener le sol à la capacité de rétention après les sécheresses de l'été. Les coefficients a, b et R ont été calculés dans chaque hypothèse et l'on obtient les relations suivantes, qui vérifient les données du tableau 1.

- | | | |
|--------------------|--|--------------|
| 1. le logarithme : | $P = 614 \log Q_{la} - 560$ | $R = 0,943$ |
| 2. la parabole : | $Q_{la} = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot P^2 - 9 \cdot 10^{-2} \cdot P$ | $R = 0,954$ |
| 3. la droite : | $Q_{la} = 0,66 \cdot P - 270$ | $R = 0,969$ |
| 4. l'hyperbole : | $Q_{la} = (0,96 P - 360)^2 / P$ (II) | $R = 0,9915$ |

On remarque que les quatre coefficients R sont tous satisfaisants.

A partir de la carte des précipitations moyennes annuelles (GAUSEN, DEBRACH et JOLY, 1958), à l'aide de la relation (I) reliant Q_{sa} à Q_{la}, et de la relation (II) reliant P à Q_{la}, une carte des érosions du Maroc a été dressée. Un planimétrage expédié a permis de dresser le tableau 2.

Le Rif occidental, qui ne couvre que 2 % du Maroc fournirait à lui seul 40 % de la terre érodée. L'étude du tableau 2 permet aussi de proposer les équivalences suivantes, valables à l'échelle régionale, entre la turbidité moyenne de l'eau, et les formes dominantes d'érosion :

Ravinement généralisé	10 g/l
Solifluxion humide	8 g/l
Entailles et ravines fréquentes	6 g/l
Entailles sporadiques	4 g/l.

FIGURE 2

Relations entre valeurs classées
(Graphiques schématiques, coordonnées logarithmiques)

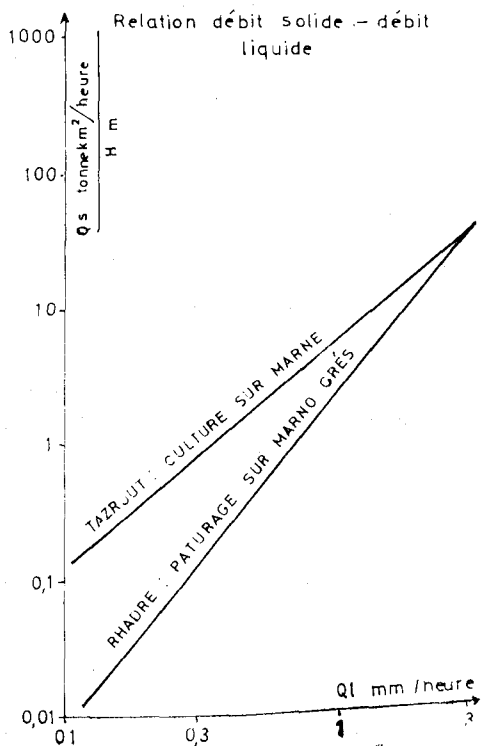
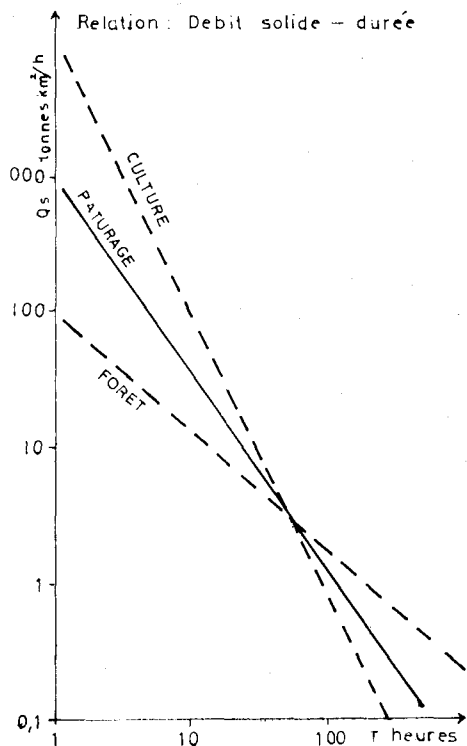
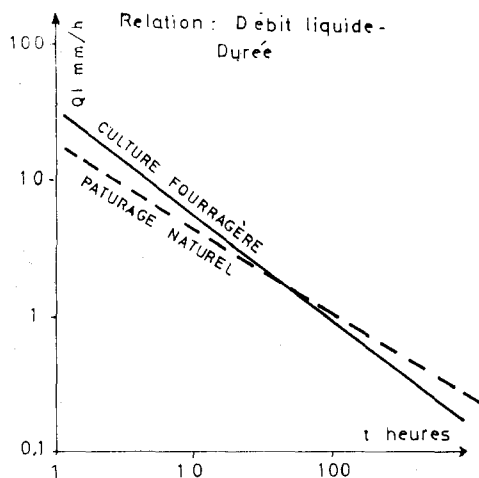
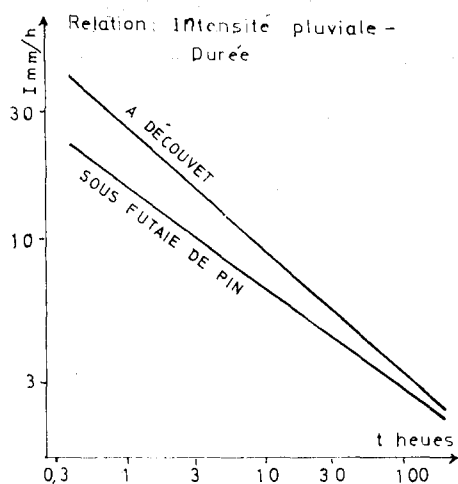


TABLEAU 2

Région	Forme d'érosion	Erosion t/km ² /an	En % de la superficie	du total perte en terre
Anti-Atlas, Sahara, plaines de la Moulouya et du Souss	Remaniements locaux	25	66	8
Plaines du Tensift, de l'Oumer Rbia, du Bou Regreg et du Sebou	Erosion lente	150	17	10
Rif Oriental, Moyen Atlas tabulaire, plateau Central, Haut-Atlas	Entailles sporadiques	400	11	20
Moyen-Atlas plissé, bordure atlantique du Rif	Entailles et ravines fréquentes	700	2	7
Bordure méditerranéenne du Rif, Pré-Rif	Ravinements généralisés	1 700	2	16
Rif Occidental	Solifluxion	3 500	2	39

B. L'étude du transport solide sur petits bassins

1. Considérations générales

L'observation montre une très inégale répartition des marques de l'érosion. L'existence des sapements de berges et de pieds de montagne démontre que l'érosion ne se produit pas seulement sur les versants. La région du Pré-Rif occidental qui présente une érosion moyenne, a été retenue pour une étude détaillée du phénomène. Au cours de ces investigations un certain nombre de relations qui paraissent avoir une portée générale, ont été mises en évidence (FIG. 2).

Soit I l'intensité pluviométrique en mm/heure, Q_l le débit liquide instantané en mm/heure Q_s le débit solide instantané en tonnes/km²/heure, nous observons que les intensités et débits classés en fonction du temps t obéissent à des relations du type :

$$y = a \cdot x^n, \text{ a et n étant des paramètres variables.}$$

Une relation semblable relie Q_s à Q_l .

Il en résulte que le débit solide annuel Q_{sa} mesuré à une station de jaugeage varie en fonction du débit liquide annuel suivant la relation :

$$Q_{sa} = a \cdot Q_{la}^n$$

En ce qui concerne les oueds de la région rifaine, n est compris entre 1,5 et 2,5.

Justification des relations observées

Si l'on observe une relation $I = a.t^n$, cela pourrait expliquer la relation $Ql = a.t^n$, le ruissellement étant sous la dépendance de la pluie.

Par ailleurs $Qs = a.Ql^n$; le débit solide croît plus vite que le débit liquide, ou si l'on préfère la turbidité $Qs/Ql = a.Ql^{n-1}$ croît en fonction du débit. Ceci est dû comme on va le voir, au fait que la fraction d'énergie W'' disponible pour l'érosion et le transport, augmente lorsque l'énergie globale W augmente, c'est-à-dire Ql croît.

Nous savons que :

$$W = S.V.i = Ql.i$$

S = section mouillée,

V = vitesse moyenne de l'eau,

i = pente de l'eau.

D'après la formule de Manning

$$\begin{aligned} R &= S/P & R &= \text{rayon hydraulique } b = \text{constante} \\ V &= b.R^{2/3}.i^{1/2} & P &= \text{périmètre mouillé } a = \text{constante} \end{aligned}$$

Il en résulte $W = P.b.R^{5/3}.i^{1/2}$.

D'autre part, soit W' l'énergie dissipée en frottement contre les rugosités du lit. On sait que : $W' = a.P.i$.

On en déduit $W/W' = (b.i^{0.5}/a) R^{5/3}$. Le terme entre parenthèse peut-être considéré comme une constante C .

Puisque $W = W' + W''$, on a $W''/W = 1 - W'/W$

$$W''/W = 1 - R^{-5/3}/c$$

Lorsque le débit Ql augmente, le rayon hydraulique R croît, l'expression W''/W croît jusqu'à une asymptote égale à 1. On peut en conclure que W'' croît plus vite que W lorsque Ql croît.

Les autres relations évoquées en début du paragraphe B découlent du fait que la primitive de la fonction $y = a.x^n$ est une fonction semblable $y = a.x^{n+1}/n+1$.

2. L'érosion mesurée sur les petits bassins versants du Pré-Rif

Les mesures ont été effectuées en utilisant l'appareillage décrit par KILPATRICK (1965) et les calculs menés suivant les méthodes

décrites dans le paragraphe précédent I.B. Les résultats sont présentés dans le tableau 3, avec les abréviations suivantes :

- S = superficie du bassin versant, en km²
 Q_{la} = lame d'eau ruisselée au cours de l'année (1/9-31/8) en mm/an,
 H = hauteur moyenne de bassin versant, en m,
 Q_{sa} = érosion globale annuelle en t/km²/an.

H se calcule comme la différence entre l'altitude moyenne du bassin versant et l'altitude de la station de jaugeage. L'altitude moyenne du bassin est définie comme étant la courbe de niveau qui sépare la surface du bassin versant en deux parties égales. Q_{la} se calcule en divisant le volume d'eau écoulé pendant l'année agricole, mesuré à la station de jaugeage, par la superficie du bassin versant. Q_{sa} est le débit solide spécifique annuel ayant transité par la station de jaugeage au cours de la même période.

Les petits bassins versants (moins de 25 km²) sont tous situés dans la région d'Ouezzane. On y a mesuré le charriage de fond, à l'aide de fosses à sédiments : il avoisine généralement 7 % du transport solide en suspension.

L'analyse graphique (FIG. 3) et le calcul statistique conduisent à la corrélation suivante :

$$Q_{sa} = 1,13 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{la}^{1,6} \cdot H^{1,003} \quad (\text{III})$$

ou $\log Q_{sa} = 1,61 \log Q_{la} + 1,003 \log H - 2,947$

avec un coefficient de corrélation $R = 0,97$. En simplifiant, cette relation peut s'écrire : $Q_{sa} = 10^{-3} \cdot Q_{la}^{1,6} \cdot H = 10^{-3} \cdot W \cdot Q_{la}^{0,6}$.

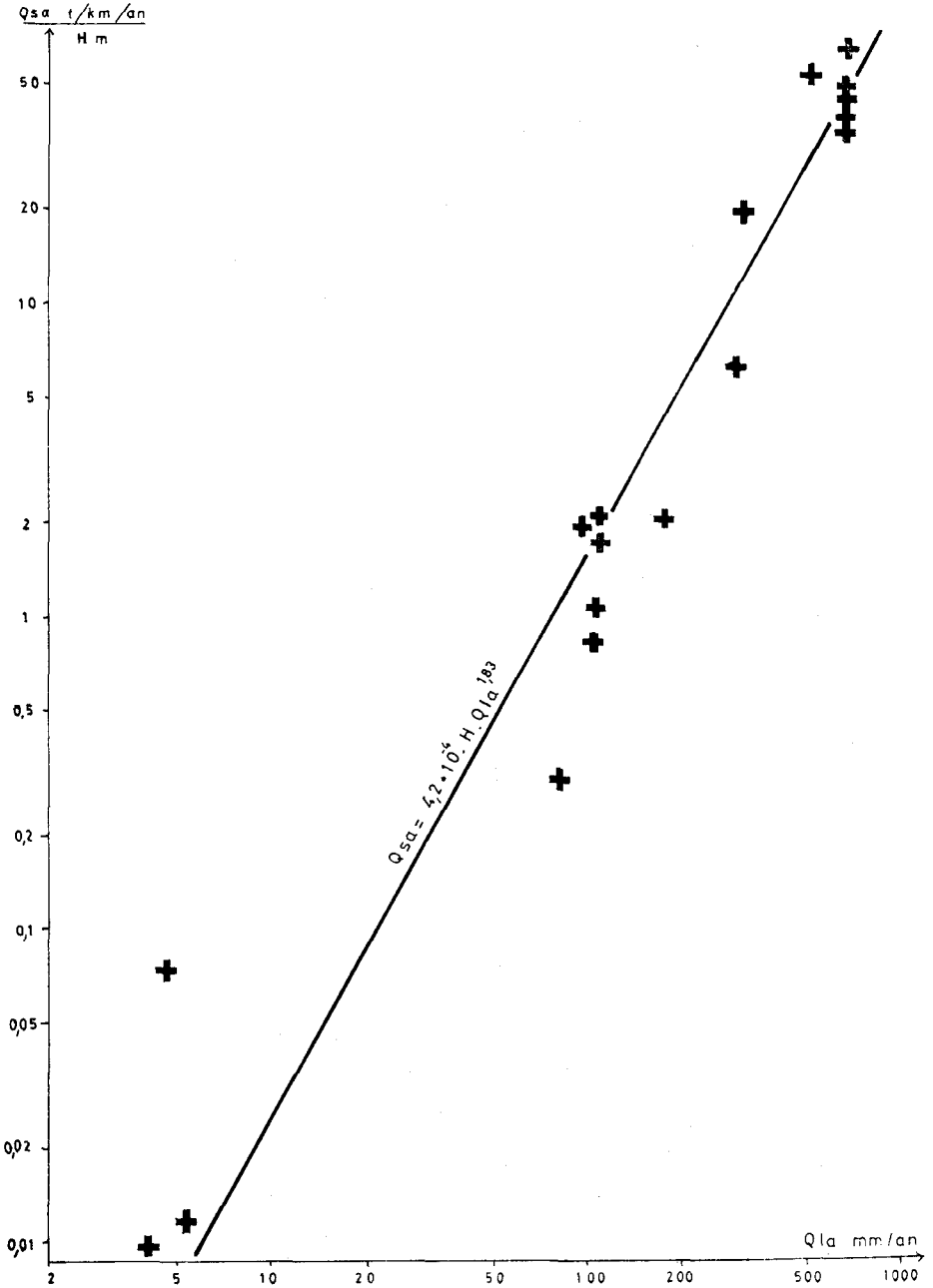
Les écarts entre valeurs mesurées et valeurs calculées qui atteignent en moyenne 15 % du chiffre mesuré sont évidemment causés par le fait que l'on néglige de tenir compte des autres caractéristiques physiques des bassins. Le Pré-Rif étant relativement homogène en ce qui concerne les sols et la végétation et ces deux facteurs étant partiellement sous la dépendance du climat et du relief, il ne peut y avoir de gros écarts par rapport à la moyenne.

On remarque que les 18 valeurs disponibles qui vérifient cette corrélation couvrent le domaine suivant :

- S est compris entre 0,8 ha et 3 300 km²,
- H est compris entre 18 et 530 mètres,

FIGURE 3

Analyse graphique de la relation entre l'érosion (Q_{sa}), la lame d'eau ruisselée (Q_{la}) et la hauteur moyenne (H) du bassin versant



- Qla est compris entre 4 et 640 mm/an, ce qui correspond, tant pour la pluviométrie que pour le ruissellement, à des années pouvant largement s'écarter de la moyenne (FIG. 1),
- Qsa est compris entre 0,3 et 4 500 t/km², et croît lorsque la taille du bassin versant augmente.

TABLEAU 3

Erosion spécifique mesurée dans le Pré-Rif

Bassin versant	Période	S	Qla	H	Qsa
Tazrout	66-67	0,909	5,4	24,3	9,3
Rhadra	66-67	0,883	4,2	67,8	0,7
D'Har Ktatan	67-68	0,008	78	18	5
Mda	66-67	24,3	4,6	122,9	9
Jorf Taaleb	67-68	0,188	100	30	25
Tazrout	67-68	0,909	104,6	24,3	52
Rhadra	67-68	0,883	101,2	67,8	74
Cheikh	67-68	1,565	103,9	66,6	116
Mda	67-68	24,3	93,3	122,9	247
D'Har Ktatan	68-69	0,008	484	18	1 000
Tazrout	68-69	0,909	624	24,3	1 000
Inaouene	33-62	3 324	167	530	1 110
Bou Deroua	36-62	8,27	295	60	1 200
Jorf Taaleb	68-69	0,188	625	30	2 000
Lebene	33-62	792	280,2	355	2 250
Rhadra	68-69	0,883	630	67,8	3 230
Cheikh	68-69	1,565	640	66,6	3 420
Mda	68-69	24,3	620	122,9	4 480

Sachant que l'énergie potentielle du ruissellement $W = Qla.H$, la corrélation (III) obtenue signifie que l'érosion est fonction de l'énergie de ruissellement, multipliée par un coefficient d'efficacité qui croît en fonction de la lame d'eau ruisselée. On peut en conclure que l'énergie absorbée pour le transport du matériel solide est minime par rapport à l'énergie déployée pour enlever ce matériel. Si l'énergie cinétique des gouttes de pluie intervenait pour expliquer l'érosion, il aurait été nécessaire d'en tenir compte dans la relation (III). Or cela n'est pas nécessaire. En effet l'énergie cinétique des pluies, calculée

par la formule de LAWS et PARSONS (1943), est égale à 16,5 joules/mm/m². Rappelons que l'eau de ruissellement déploie une énergie potentielle de 9,82 joules/mm/m² lorsque la hauteur H du bassin versant est égale à 1 mm.

L'existence de cette corrélation (III) implique que le réseau hydrographique ne peut être assimilé à un collecteur d'égout, évacuant les matières solides érodées sur les pentes. Il joue un rôle dynamique et commande l'évolution des versants.

En appliquant une relation simplifiée :

$$Q_{sa} = a.Q_l a^{1,6}.H.10^{-4}$$

aux données du tableau 1, on obtient les valeurs extrêmes de a suivantes :

Aïn Timedrine (bassin non cultivé sur calcaire karstique) a = 1,8

Tissa (bassin cultivé sur marne tendre) a = 7,7

En ce qui concerne les bassins sur schistes ou marnes schisteuses, le coefficient a varié de 2 à 5 suivant la densité de la couverture végétale

(Rhafsai a = 2,1 ; El Kansera a = 5,4)

C. La perte en terre des versants, par ruissellement diffus ou concentré

20 parcelles de mesure d'érosion sous pluie naturelle ayant fonctionné pendant trois ans à la station du Mda, près d'Ouezzane et 60 essais sur parcelles au simulateur de pluie ont permis un certain nombre de mesures.

L'équipement des parcelles fixes est conforme à l'appareillage décrit par FOURNIER (1955). La valeur médiane des pertes mesurées annuellement se rapproche de la valeur calculée à partir de la corrélation du paragraphe I.C (chiffres de perte en terre en t/km²/an).

TABLEAU 4

Erosion moyenne des versants

Campagne de mesure	1966-67	1967-68	1968-69
Valeur calculée	0,0001	0,65	600
Médiane mesurée	0	7,0	836

En tout point du versant l'érosion varie en fonction du ruissellement et de la pente suivant la relation :

$$Q_s = 24,4 \cdot Q_l \cdot e^{0,05 \cdot i} \quad (\text{KALMAN, 1970}) \text{ avec}$$

Q_l = débit liquide instantané en mm/h

Q_s = débit solide instantané en t/km²

i = pente en %.

Il n'a pas été possible de calculer Q_l à partir des pluies, mais les constatations suivantes ont été faites.

Sur un versant la lame d'eau ruisselée Q est égale à la somme du ruissellement de surface Q_l , et du ruissellement hypodermique. Le débit Q croît en fonction de l'intensité I de la pluie, et de la longueur L du versant, mesurée à partir de la crête. Lorsque I est inférieur à la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, toute la pluie pénètre, à condition que la circulation hypodermique soit suffisamment rapide. Cette vitesse de circulation est sous la dépendance de la loi de Darcy ; elle augmente avec la charge hydraulique, c'est-à-dire l'intensité pluviale et la pente du terrain. Pratiquement, avec les faibles intensités pluviales que l'on observe au Maroc (0,5 - mm/heure), le ruissellement de surface n'est important qu'en bas de versant. C'est dans cette zone que transite le maximum d'eau, et avec des vitesses faibles, puisque la pente est faible. Dans ces conditions le sol est gorgé d'eau et le ruissellement de surface s'installe.

L'érosion sera fonction de la lame d'eau ruisselée, et de son énergie.

L'exemple suivant illustre ces affirmations, il concerne trois groupes de deux parcelles échelonnés le long d'un même versant.

TABLEAU 5

Influence de la pente et de la position topographique sur l'érosion mesurée à la parcelle

(total pluviométrique annuel 725 mm, sol nu sur marne)

Distance de la ligne de crête, en m	120	160	220
Pente en %	35	25	12
Ruissellement cumulé en mm	0,1	1,0	12,9
Energie du ruissellement, en joules/m ²	4	27	169
Erosion en t/km ²	5,8	8,7	342

La manipulation de la couverture végétale et le travail du sol modifient la perméabilité K , le ruissellement Q_{la} , et l'érosion Q_{sa} comme on le constate avec les exemples suivants :

TABLEAU 6

Erosion et mise en valeur des sols sur marne à argile sodique

Précipitations 1 180 mm, pente 25 %	K mm/heure	Q_{la} mm/an	Q_{sa} t/km ² /an
Végétation naturelle (maquis)	50	4,6	30
Sol nu en jachère	38	5,4	68
Labour à l'araire (blé dur)	18	21,5	196
Labour au tracteur (blé dur, fumure)	6	52,0	543

Le labour, particulièrement à la charrue à disque crée une semelle de labour peu perméable, et diminue la cohésion du sol. L'érosion croît avec l'intensité de la mise en valeur. Le remplacement d'une espèce végétale par une espèce analogue de même type, par exemple pin des Canaries et chêne-liège, maquis et pâturage, blé dur et alpiste, modifie peu les pertes en sol ; par contre la productivité du terrain peut être considérablement améliorée. De même la modification des méthodes de travail du sol, l'emploi d'engrais et de variétés sélectionnées augmentent les rendements, sans beaucoup influencer sur les taux d'abrasion. En éliminant la culture des versants, et en intensifiant la production sur les terrains plats, on peut espérer réduire l'érosion agricole du bassin versant, sans modifier le revenu des habitants dans les mêmes proportions.

Les griffes d'érosion

En dehors d'une érosion diffuse par des filets d'eau plus ou moins individualisés, on observe fréquemment sur les versants de véritables griffes d'érosion, soit rigoles peu profondes qu'effacent les labours d'automne (rills) soit véritables ravines qui entaillent les versants (gullies). Les unes et les autres sont les indices d'une érosion accélérée.

Plusieurs parcelles ont présenté des traces d'érosion des rigoles, les pertes annuelles en terre étant comprises entre les extrêmes suivants :

TABLEAU 7
Erosion en rigoles

Campagne	1967-68	1968-69
Ruissellement de surface, en mm/an	15,7	323
Erosion, en t/km ² /an	508	5 495

L'érosion en ravines est particulièrement préoccupante. L'une de celles-ci draine un bassin versant de 6 ha, dont 1,5 ha environ sur marne profondément disséquée par les ramifications de la ravine. La turbidité moyenne annuelle des eaux qui s'écoulent est voisine de 200 g/l. L'érosion, extrêmement vigoureuse, se traduit par les dégradations spécifiques du bassin versant du tableau 8.

TABLEAU 8
Erosion par ravines : bassin de l'Oued Zelzala

Campagne	1966-67	1967-68	1968-69
Précipitations, en mm/an	564,5	681,7	1 143,1
Ruissellement, en mm/an	4,5	102,5	578
Erosion, en t/km ² /an	200	4 187	27 900

Les berges instables de l'Oued s'éboulent ou glissent au fond de la ravine et les matériaux sont repris par le ruissellement.

Des turbidités moyennes presque aussi fortes ont été observées sur des oueds drainant des bassins versants plus importants, par exemple l'oued Amassine, près de Tahar Souk — Bassin versant 45 km², turbidité 50 g/l — ou l'oued Fodda, Algérie — Bassin versant 770 km², turbidité 28,5 g/l — Ces bassins sur roches tendres présentent les traces d'une érosion intense.

II. Le contrôle de l'érosion

Une lutte efficace contre l'érosion exige l'élaboration d'un plan d'action rationnel. Il faut intervenir au bon endroit, aux moindres frais, en fonction du but recherché.

A. Un bilan de l'érosion

A titre indicatif, le tableau 9 indiquant les origines des matériaux transportés par l'Oued Mda, a été dressé à partir de nos observations.

TABLEAU 9
Provenance de l'érosion, en %

Campagne	1966-67	1967-68	1968-69
	année sèche	année moyenne	année humide
Versants	0,01	3	19
Ravines (gullies)	67	52	19
Sapement de berges	33	45	62
Total	100	100	100

Le sapement de berges a été calculé par différence. Il correspond d'une part à un élargissement actuel du lit des rivières, consécutif au défrichement qui augmente l'amplitude des crues, et d'autre part à la poussée des versants sur les berges à la suite de glissements de terrains. La destruction de la végétation naturelle et son remplacement par une couverture de céréales, entraîne la disparition progressive de l'armature fournie par un puissant réseau de racines solides, ce qui diminue la cohésion du versant et facilite le glissement du manteau d'altération vers le bas.

Le tableau 9, montre que si l'on supprime l'érosion par ruissellement de surface sur les versants sans modifier la vitesse d'écoulement des eaux, l'érosion globale ne sera que faiblement atténuée.

En effet l'énergie potentielle du ruissellement s'extériorise essentiellement en dehors des versants, le long du réseau hydrographique.

B. Le contrôle de l'érosion agricole

L'érosion agricole se traduit par une érosion en nappe ou en rigoles, qui entraîne une perte de fertilité du terrain, et par une érosion en ravines, qui diminue la superficie cultivable.

La première n'est dangereuse que si la vitesse de régénération du sol à partir de la roche-mère sous-jacente est inférieure à la vitesse de l'érosion. La vitesse d'altération des roches est très mal connue, et paraît varier en fonction de la pluviométrie. En première approxi-

mation, d'après nos observations, nous proposons les vitesses de régénération suivantes :

Calcaire compact	1 cm en 2 000 ans
Schiste	1 cm en 300 ans
Marne	1 cm en 10 ans

sous une pluviométrie moyenne annuelle de 500 mm.

L'érosion en nappe ou en rigoles est surtout dangereuse dans les terrains où la pédogenèse s'effectue au ralenti — Pluviométrie inférieure à 400 mm, roches peu altérables — et dans les régions où les orages d'été à forte intensité pluviale sont fréquents. Dans ces conditions il est difficile de maintenir une couverture végétale dense autre que le maquis ou la steppe. Si les nécessités imposent la culture, il est possible de diminuer la force vive des eaux sauvages en modelant le versant par des terrasses en escalier. La banquette de rétention où les eaux troubles se décantent et s'infiltrent est efficace en terrain limoneux. C'est ainsi que les 9/10 des terrains traités en banquettes aux U.S.A. sont, pour des raisons climatiques* et pédologiques** situés en Oklahoma, Kansas et Nebraska. Lorsque des pierres sont disponibles, la correction torrentielle peut être envisagée, en consolidant les atterrissements par la plantation d'arbres. Le traitement des zones affouillables des cours d'eau est toujours d'un coût très élevé, et son efficacité est limitée aux sections traitées.

Sous climat humide il est préférable de s'orienter vers des méthodes biologiques — boisement par des arbres forestiers, fruitiers ou taillis d'arbres fourragers ; enherbement — de coût moins élevé. La banquette a plus tendance à modifier la forme de l'érosion qu'à diminuer son intensité. Dans bien des cas, une érosion par ruissellement de surface se transforme, soit en érosion par solifluxion si l'on plante des banquettes de rétention, soit en érosion par ravines si l'on plante des banquettes de diversion. Les méthodes biologiques impliquent le remplacement d'une agriculture primitive — culture itinérante sur brulis ou céréaliculture extensive — par une économie montagnarde évoluée associant l'élevage sur terrains argileux à l'exploitation forestière ou arboricole sur terrains plus cohérents, ou plus stables.

* La lame d'eau ruisselée annuellement varie de 10 à 70 mm.

** Sols sur limon éolien à structure instable.

C. Le contrôle de l'érosion globale

La végétation contribue fortement à régulariser la circulation de l'eau et transforme une précipitation violente et discontinue en un écoulement relativement stable. Le défrichement et la mise en culture des versants montagneux se traduisent par une augmentation de l'amplitude des crues. Les lits des oueds s'élargissent pour laisser le passage à un débit maximum en augmentation, et corrélativement le débit solide augmente à son tour par sapement de berges. Le tableau 10 compare la fréquence des inondations graves dans la plaine du Rharb au cours des deux périodes 1904-1937 et 1937-1970, à la fréquence des années à forte pluviométrie à Tanger et Essaouira, seules stations disponibles, qui malheureusement ne font qu'encadrer le bassin versant.

TABLEAU 10

Fréquence comparée des précipitations et des inondations

Période	1904-1937	1937-1970
<i>Rharb</i> : Nombre d'inondations à volume de débordement supérieur à 100 hm ³	4	12
<i>Tanger</i> : Nombre d'années à pluviométrie supérieur à 1 000 mm	7	11
<i>Essaouira</i> : Nombre d'années à pluviométrie supérieure à 400 mm	4	5

Il ressort de ce tableau que la fréquence des inondations a augmenté pendant la deuxième période, le coefficient d'accroissement étant de 3,5 ; la fréquence des années à forte pluviométrie est également en augmentation, le coefficient moyen d'accroissement étant seulement de 1,4. La différence des taux d'accroissement serait sans doute à imputer au défrichement des montagnes du Rif et de l'Atlas, consécutif à un accroissement démographique anormalement élevé.

L'accroissement du débit solide global et l'augmentation de l'amplitude des crues gênent peu le montagnard. N'en supportant pas les conséquences, il cherche peu à y remédier. Par contre l'envasement accéléré des barrages, la désorganisation du réseau de communications, la destruction des récoltes par l'inondation, le comblement des ports d'estuaires touchent l'ensemble de la communauté. Pour lutter contre

l'érosion globale, il faut envisager une solution efficace globalement. Sur le plan technique on peut :

- atténuer les fortes intensités pluviométriques ;
- laminier les pointes de crue ;
- augmenter la cohésion du sol et diminuer la turbidité des eaux (FIG. 2).

Modification des intensités pluviométriques

Les pluies dont l'intensité est très variable dans le temps, sont interceptées par le feuillage. Les pointes pluviométriques sont atténuées par un stockage temporaire et partiel sur l'écran foliaire. Au contraire les pluies de faible intensité durent plus longtemps sous forêt qu'en plein air. Ce phénomène d'observation courante a été vérifié à l'aide de pluviographes disposés sous divers espèces végétales. La densité du feuillage, la forme et la disposition des feuilles interviennent évidemment sur le phénomène.

Modification des débits liquides

La vitesse du ruissellement sur les versants peut être modifiée en intervenant sur le ruissellement de surface et sur le ruissellement hypodermique. L'absence de litières augmente la vitesse du ruissellement de surface. La modification de la porosité — compactage de la surface, semelle de labour... — diminue la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer. Enfin certaines observations faites en cases lysimétriques à Coshocton (HARROLD et DREIBELLIS, 1958) montrent que la vitesse de percolation est augmentée par le labour.

Le travail du sol modifie considérablement la répartition des débits liquides, par une transformation de la porosité du sol. Cette altération de la structure paraît d'autant plus grave que les façons culturales sont conduites avec énergie. L'utilisation des désherbants sélectifs, la suppression du labour ou sa limitation à la mise en place de la semence sont des techniques dont le retentissement sur l'intensité du débit liquide reste à étudier.

La régularisation du débit liquide a non seulement pour effet de diminuer la fréquence des gros débits instantanés, mais aussi, comme on peut le constater sur le tableau 11, de diminuer l'importance du transport solide global.

S'il avait été possible d'écouler les 24 000 m³ de la tranche horaire 6 000 - 9 000 en 500 heures au lieu de 4, le transport solide

TABLEAU 11

Oued Rhadra — Campagne 1968-69. Tableau des débits horaires classés

Tranche de débit m ³ /heure	Durée en heures	Débit liquide en m ³	Débit liquide en % du total	Débits solides en tonnes	Turbidité moyenne en g/l
0- 100	500	39 000	7	1	0,025
100-1000	1 380	310 000	56	71	0,72
1000-2000	80	86 000	15	183	2,1
2000-4000	26	56 000	10	435	7,8
4000-6000	10	41 000	7	999	24,3
6000-9000	4	24 000	5	1 161	48,4

annuel aurait été réduit de 40 % et le débordement de la rivière évité.

Modification de la turbidité de l'eau

La turbidité est égale au quotient Q_s/Q_l . Nous avons vu, en I.B., que $Q_s = aQ_l^n$ avec n voisin de 2 ; il en résulte que $Q_s/l = aQ_l^{n-1}$. La turbidité est particulièrement forte en ce qui concerne les forts débits, comme on le constate sur le tableau 11. En diminuant l'amplitude des crues on diminuera également le débit solide moyen annuel.

Mais d'autre part il est également possible d'agir sur le paramètre a et l'exposant n de la relation $Q_s = aQ_l^n$. Ces paramètres, fonctions des caractéristiques physiques du bassin versant, traduisent l'efficacité avec laquelle la lame d'eau qui ruisselle arrive à éroder. En modifiant la porosité, le taux de matière organique ou la structure, on transforme l'aptitude du sol à résister à l'érosion, c'est-à-dire que l'on modifie a et n .

En définitive une diminution de la turbidité moyenne annuelle peut être obtenue (FIG. 2) :

- directement, en réduisant la sensibilité du sol à l'érosion ;
- indirectement, par atténuation des pointes pluviométriques et par régularisation de l'écoulement du débit liquide.

Ce résultat peut être obtenu, soit par des traitements mécaniques localisés aux zones d'érosion intense, soit par traitements biologiques sur l'ensemble du bassin versant.

Efficacité du traitement des bassins versants

Il existe très peu d'études portant sur la modification du taux d'érosion. Le tableau 12 rassemble quelques données permettant une appréciation de l'efficacité de différents traitements de petits bassins versants (TELLER, 1968).

TABLEAU 12

Influence de traitements sur l'érosion spécifique globale

Bassin versant	Pays		Erosion spécifique	
			avant traitement	t/km ² /an après traitement
Harz	Allemagne	Déboisement	18,6	58,6
Oued Fodda	Algérie	Banquettes sur 20 % de la superficie	4 600	4 600
Parker Branch	U.S.A.	Aménagements agricoles	695	246
Sperbelgraben		Forêt	—	65
Rappengraben	Suisse	Pâturage	—	208
Pine Tree Branch	U.S.A.	Reboisement	5 443	246

On a vu que la modification de la couverture végétale a une influence extrêmement nette sur l'érosion des versants par ruissellement de surface, mais celle-ci ne participe que pour une faible part à l'érosion globale. Le tableau 12 montre que l'influence indirecte du traitement biologique sur l'érosion globale est beaucoup plus importante que ce que l'on aurait pu déduire des mesures sur parcelles.

Les observations faites sur de petits bassins versants peuvent-elles être extrapolées à des bassins de grande taille? Dans ce cas il ne peut être question d'expérimentation directe. L'étude de corrélations apporte une réponse indirecte affirmative. L'amplitude d'une crue décroît à mesure que la taille du bassin versant augmente, essentiellement parce que les crues des différents affluents ne sont pas synchrones. Généralement ce laminage suit une loi statistique du type.

$$QI = A.S^n$$

avec A : débit de crue du bassin versant de surface unitaire,
 Ql : débit de crue du bassin de surface S,
 n : $1/3$ dans la région méditerranéenne (SOKOLOVSKY, 1967).

Il est évident que toute modification du régime hydrologique A se répercute sur le débit Ql. En ce qui concerne directement le transport solide, différents auteurs, en particulier LANGBEIN (1958), ont montré que celui-ci était sous la dépendance de la densité du couvert végétal.

S'il paraît désirable, par exemple pour diminuer la vitesse d'envasement d'un barrage, de réduire le taux d'érosion global, il convient de localiser les zones d'intervention et d'établir un calendrier des opérations en fonction des urgences.

Les zones prioritaires sont situées dans les régions à forte pluviométrie, sur les terrains à pente forte, dans les zones de roche tendre et à végétation déficiente. Le plus souvent il faudra choisir entre :

— un traitement mécanique par stabilisation des ravins, fixation des glissements de terrain, protection de berges. Ces travaux sont extrêmement coûteux, de construction et d'entretien. La dépense n'est pas justifiée par la valeur vénale du terrain, sauf s'il s'agit d'une voie de communication ;

— un traitement biologique par un aménagement rationnel du terrain, abandon de la surexploitation et déplacement de la population en surnombre. Le traitement mécanique vise simplement à contrecarrer les effets de l'érosion. Le traitement biologique, plus subtil, agit en modifiant les causes qui ont déclenché l'accélération de l'érosion ; l'existence de multiples coefficients multiplicateurs entraîne une série de réactions en chaîne.

Conclusion

Dans de nombreux pays les pluies tombent essentiellement en été, sous forme d'orages locaux à forte intensité. Dès que l'on sort de la zone arrosée, les eaux de ruissellement s'infiltrent dans la terre sèche. L'érosion spécifique est maximum à la parcelle et décroît progressivement, du fait des atterrissements intermédiaires, à mesure que la taille du bassin versant augmente.

Au Maroc les pluies sont essentiellement le fait de perturbations hivernales, de type frontal à faible intensité. Le phénomène d'in-

filtration progressive ne se produit pas, le débit liquide spécifique reste constant, lorsque la taille du bassin versant augmente. Il en résulte non seulement que la force vive des eaux est toujours suffisante pour transporter les alluvions en transit, mais que bien souvent la rivière dispose d'un supplément d'énergie disponible pour approfondir son lit ou élargir sa vallée. Dans ces conditions l'érosion spécifique augmente à mesure que la taille du bassin versant augmente. Cette particularité climatique nous a conduit à rejeter un grand nombre de techniques de conservation des sols appliquées avec succès sous d'autres climats.

C'est un exemple de la nécessité, qui subsiste dans nombre de cas, de comprendre les impératifs locaux avant de procéder à un transfert brutal de techniques élaborées dans d'autres pays.

Manuscrit déposé le 7 Mars 1969

ملخص

اعتمادا على نتائج صبيح جامد قدر على خمسة عشر سفوح أحواض المغرب — بين الباحث بصفة متوالية وجود علاقات بين الصبيب الجاهد والسائل القليل من الماء — وبين ذلك السائل القليل من الماء والكمية الضئيلة المنصبة — ان خارطة معذل سقوط الامطار سنويا تمكن حينئذ حسب الارقام تقدير الجرف في أهم النواحي المغربية .

وان اعتبارات متشابهة انجزت على سفوح صفار الاحواض قد دفعت بالباحث على ان يتبنت أهمية السائل تحت الارض بالنسبة للسائل على سطح الارض — وذلك حسب الموقع لطبوغرافى وبعض العمليات الزراعية .

وأخيرا ان بعض الاجراءات الدقيقة قد مكنتنا من تحديد في الزمان والمكان قوة الجرف — وان هذا التقدير قد دفعنا باختيار موقع التدخل وطرق محاربة جرف المياه .

RÉSUMÉ

Se fondant sur les résultats de débits solides mesurés sur quinze bassins versants du Maroc, l'auteur met successivement en évidence l'existence de corrélations entre le débit solide et la lame d'eau ruisse-

lée, puis entre la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau précipitée. La carte des précipitations moyennes annuelles permet alors une estimation chiffrée de l'érosion dans les principales régions du Maroc.

Des considérations analogues faites sur petits bassins versants le conduisent à préciser l'importance du ruissellement hypodermique par rapport au ruissellement de surface en fonction de la position topographique et de quelques interventions agricoles.

Enfin des mesures précises ont permis de localiser dans le temps et dans l'espace, l'intensité de l'érosion. Cette dernière estimation conduit alors au choix du lieu d'intervention et des méthodes de lutte antiérosive.

RESUMEN

Fundándose en los resultados de caudales sólidos medidos sobre quince cuencas vertientes de Marruecos, el autor pone sucesivamente en evidencia la existencia de correlación entre el caudal sólido y la cascada de agua fluente, después entre la cascada de agua fluente y la cascada de agua precipitada.

El mapa de las precipitaciones medias anuales permite tener una estimación en cifras de la erosión, en las principales regiones de Marruecos.

Algunas consideraciones análogas hechas sobre pequeñas cuencas vertientes, le conducen a precisar la importancia de la fluencia hipodérmica con relación a la fluencia de superficie en función de la posición topográfica y de algunas intervenciones agrícolas.

Por fin, algunas medidas precisas han permitido localizar en el tiempo y en el espacio, la intensidad de la erosión. Esta última estimación conduce entonces a la elección del lugar de intervención y de los métodos de lucha antierosiva.

SUMMARY

Based on the siltation measurements data obtained from fifteen watersheds in Morocco, the author discovers the existence of a series of correlations between siltation and the sheet of water runoff, then between the sheet of water run off and the sheet of water produced by precipitation.

He concluded that an estimate of erosion in the principal regions of Morocco can be worked out from an average annual precipitation map. Analogous considerations made for small watersheds allow us to state exactly the importance of hypodermic runoff with regard to surface runoff, and to take into account the topographic situation and the agricultural interventions.

Finally these precise measurements have allowed us to locate in time and space the intensity of soil erosion, such appraisal will help to select the zone of intervention and the methods adequate to fight erosion.

BIBLIOGRAPHIE

- FOURNIER, F. — 1955. Etudes sur l'érosion et la conservation des sols. — Bulletin Scientifique N° 6, pp. 38-88, Centre technique d'Agronomie tropicale, Nogent-sur-Marne.
- GAUSSEN, H., J. DEBRACH et F. JOLY — 1958. Précipitations annuelles — Cartes et notice, Atlas du Maroc II, 4a, Institut scientifique chérifien, Rabat.
- HARROLD, L.L. et F.R. DREIBELBIS — 1958. Evaluation of agricultural hydrology by monolith lysimeters. — U.S.D.A., Tech. Bull., 1179, Washington.
- KALMAN, R. — 1972. Ruissellement et érosion en nappe (expérimentation ou simulation de pluie). — Annales de la Recherche Forestière au Maroc, Tome 12, Rabat.
- KILPATRICK, F.A. — 1965. Surface water techniques: Use of flumes in measuring discharge at gaging stations. — U.S. Geological Survey, 1-16, pp. 1-27.
- LANGBEIN, W.B. — 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. — Trans A.G.U., 39-6, pp. 1076-1084.
- LAW, J.O. et D.A. PARSONS — 1943. The relations of drop size to intensity. — Trans. A.G.U. 24, pp. 452-460.
- SOKOLOVSKY — 1967. Actes du colloque sur les crues A.I.H.S. U.N.E.S.C.O. Leningrad.
- TETTER, H.L. — 1968. Influence de la forêt sur les crues et inondations — Unasyva, 22 - 1,88, pp. 18-20. F.A.O. Rome,