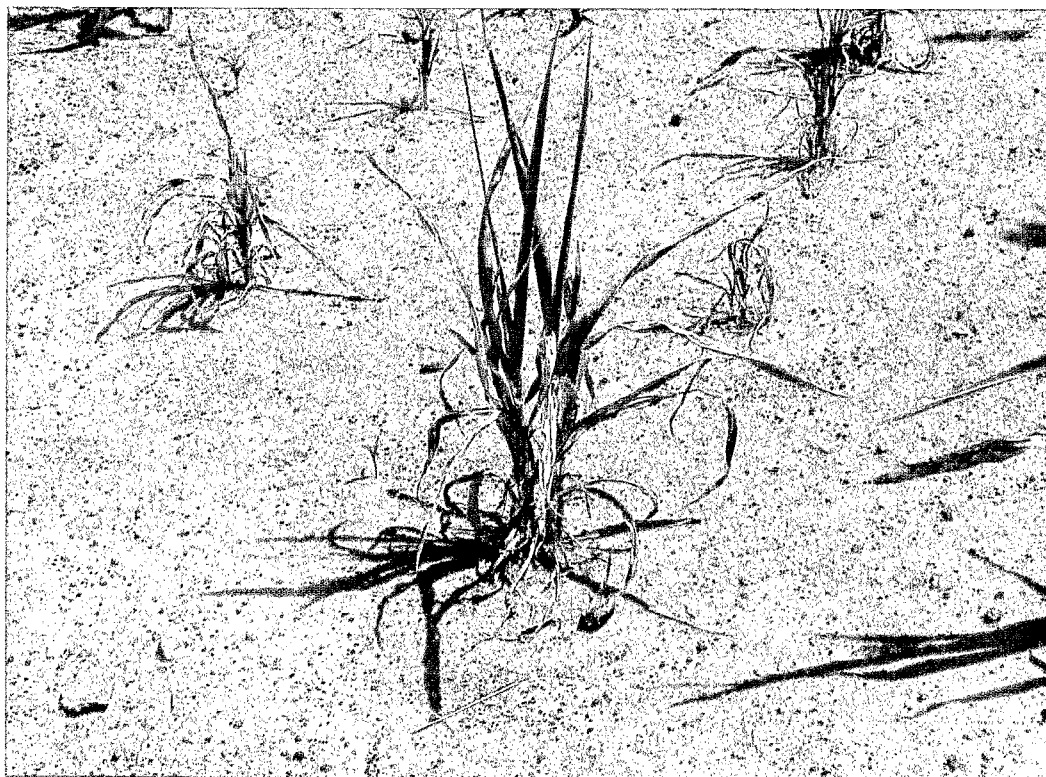


RÉFLEXIONS THÉORIQUES DU RUISSELLEMENT ET DE L'ÉROSION

Bases d'un contrôle
Application à la détermination des écartements
entre dispositifs anti-érosifs

par Serge GUILLOBEZ

Ingénieur de recherche CIRAD/IRAT à la Mission française de Coopération et d'Action Culturelle au Burkina Faso



Kirsi (Burkina Faso), fin d'hivernage 1990 : sol battant riche en limons et sables fins, rugosité très faible, sol lisse encroûté, total des précipitations 420 mm, rendement en sorgho très faible.

SUMMARY

THEORETICAL CONSIDERATIONS ON THE MODES OF SURFACE RUN-OFF AND EROSION Foundations for control

Application : determine spacing between anti-erosion devices

The violence of rainfall acts upon the conditions of the soil surface, changes them and provokes run-off. The intensity and duration of rainfall are important factors of run-off.

The soil characteristics which affect run-off are as follows : the condition of the surface (liable to change under the action of downpour), its composition (grade, quantity of organic matter) and its hydrodynamic properties.

The run-off of waters at the surface of the soil was studied mathematically with the help of DARCY's method and the stream flow equation. The rational formulae obtained in a stable system show that :

- *run-off and erosion depend on the length of the plot, the quantity of rainwater and the likelihood of infiltration of water into the soils,*

- *erosion also depends on the intensity and the duration of the rain, the slope and the roughness of the soil.*

The hierarchical organization of these factors helps to determine the appropriate means of fighting these phenomena.

A method (P.R.I) which allows the spacing of anti-erosion devices to be determined has been suggested and compared with the various present methods. It takes into account a risk factor, the intensity of rainfall over thirty minutes and the roughness of the soil (vegetation and soil surface).

Key-words : rainfall, intensity over thirty minutes, run-off, erosion, conditions of surface, roughness, slope, subsurface run-off, anti-erosion devices.

RESUMEN

REFLEXIONES TEORICAS ACERCA DE LAS MODALIDADES DE ESCORRENTIA Y DE EROSION Fundamentos para un control

Aplicación para la determinación de las separaciones entre dispositivos contra la erosión

La violencia de las precipitaciones influye sobre los estados de superficie de los suelos, los modifica y provoca la escorrentía. La intensidad y la duración constituyen importantes factores de escorrentía.

Las características del suelo, de las cuales depende la escorrentía, son : su estado de superficie (susceptible de variar bajo la acción del asentamiento), su composición (granulometría, abundancia de materias orgánicas) y sus propiedades hidrodinámicas.

El flujo de las aguas en la superficie del suelo ha sido objeto de estudios matemáticos, por medio de la fórmula de DARCY y de la ecuación del caudal. Las fórmulas racionales obtenidas en régimen estable demuestran que :

- *la escorrentía y la erosión dependen de la longitud de la parcela, de la cantidad de aguas pluviales y de las posibilidades de infiltración del agua en los suelos,*

- *la erosión depende, además, de la intensidad y de la duración de la lluvia, de la pendiente y de la rugosidad del suelo.*

La jerarquización de estos factores permite definir los medios de lucha adecuados.

Una fórmula (P.R.I.) que permite determinar la separación de los dispositivos antierosión fue objeto de propuestas y de comparación con las diversas fórmulas existentes. En dicha fórmula se tiene en cuenta un factor de riesgo, de la intensidad en treinta minutos de las precipitaciones pluviales y de la rugosidad del suelo (vegetación y superficie del suelo).

Términos clave : precipitaciones, intensidad en treinta minutos, escorrentía, erosión, estados de superficie, rugosidad, pendiente, infiltración, dispositivos antierosión.

Le sol constitue le support des cultures ; c'est une entité dynamique, s'approfondissant sous l'action des processus de pédogenèse mais s'amincissant sous l'action de l'érosion (ablation des horizons de surface). Dans ce dernier cas, c'est l'interface sol-atmosphère qui est concernée.

Cette interface est constituée, d'une part, d'une surface plus ou moins régulière présentant un micro-modèle susceptible d'être modifié et pouvant prendre plusieurs états de surface et, d'autre part, de volumes en contact avec l'atmosphère formés par la végétation.

Cette interface, très complexe, est soumise aux agents climatiques et principalement aux précipitations.

L'action des précipitations en fonction de leurs intensités sur le sol provoque des modifications en surface qui dépendent des propriétés de celui-ci et qui déterminent l'infiltration de l'eau dans le sol. L'écoulement des eaux en surface est régi par des lois physiques qui tiennent compte de la rugosité de l'interface eau-sol et de sa pente. L'étude mathématique de certaines de ces lois sert à l'établissement des formules rationnelles du ruissellement. La prise en compte des conditions d'arrachement et de transport des particules permet de se fixer un seuil-limite pour la vitesse d'écoulement. La distance à laquelle l'eau de ruissellement atteint cette vitesse-limite, moyennant des hypothèses simplificatrices, peut être estimée à l'aide des formules du ruissellement en fonction d'un critère climatique simple : l'intensité des pluies en 30' et un paramètre plus difficile à déterminer : la rugosité globale du sol.

L'intérêt de cette démarche est non seulement d'établir une famille de courbes, qui englobent toutes les courbes déduites des formules empiriques existant, mais également d'établir des hiérarchies entre les différents paramètres qui conduisent au ruissellement puis à l'érosion des sols, en fonction des conditions locales (climat, sol) et ainsi de proposer des moyens d'intervention classés logiquement.

LES PRÉCIPITATIONS

Seules les précipitations sous forme de pluie seront abordées ici.

Trois facteurs importants caractérisent les précipitations pluviales ; ce sont leur volume (pluviosité : P), leur intensité (I) et leur durée (temps : T).

Le déclenchement des processus, de ruissellement d'abord et d'érosion ensuite, est sous la dépendance des effets des précipitations sur l'interface sol-atmosphère.

Parmi ces facteurs, l'intensité est le paramètre le plus important. Il régit d'abord les phénomènes de battance en fonction de l'état de surface et du couvert végétal ; puis, il peut provoquer la modification de l'état de surface. La taille des gouttes de pluie est sous la dépendance de la violence des pluies ; la plupart d'entre elles atteignent une dimension maximale ($d = 2,5$ mm) pour des intensités de 80 à 100 mm/h. A ces intensités, la vitesse maximale des gouttes de pluie est de l'ordre de 7,5 m/s. Vitesse et masse (taille) sont les deux paramètres pris en compte pour calculer l'énergie cinétique. Celle-ci est donc une fonction croissante de l'intensité des pluies. En climat tropical, des intensités de 80 à 100 mm/h sont courantes pour des durées de 5 à 10 min. et possibles pendant 30 min. pour des périodes de retour de dix ans au moins.

La pluviosité totale est à prendre en compte en fonction du sol et des états de surface ; en effet, un système anti-érosif peut limiter le ruissellement dû à l'intensité de la pluie pendant un certain temps mais n'avoir plus d'influence à la suite d'une trop forte pluie (aspect quantitatif).

Des formules ou des abaques permettent pour l'Afrique de l'Ouest d'évaluer l'intensité de la pluie pour une précipitation de durée donnée en fonction des précipitations en 24 heures de même fréquence. En fait, l'intensité en 30 min., ainsi estimée, n'est qu'une valeur approchée du I_{30} de WISCHMEIER ; elle lui est souvent inférieure.

L'énergie cinétique d'une pluie peut être estimée à partir de l'intensité. Elle est proportionnelle au logarithme de l'intensité d'après WISCHMEIER (1960, 1965). Cet auteur a, par ailleurs, proposé un indice d'agressivité des pluies (R) qui doit être calculé pluie par pluie. Il est fonction de l'énergie cinétique des gouttes de pluie et de l'intensité maximale en 30 min. (I_{30}).

Au Burkina Faso, GALABERT et MILLOGO (1972) ont établi une relation qui permet le calcul rapide de cet indice. Pour chaque pluie, l'indice est une fonction linéaire du produit de la pluie P par l'intensité en 30 min. (I_{30}) :

$$R = 0,0158 \cdot P \cdot I_{30} - 1,2$$

ROOSE (1979), pour le même pays (station de Saria), a proposé un abaque (coordonnées Log-Log) liant cet indice directement à la pluviosité ; la formule déduite de l'abaque est :

$$R = 0,0295 \cdot P^{1,89}$$

Cette dernière formule permet, quand on connaît chaque pluie, d'estimer la valeur annuelle de R de façon satisfaisante en l'absence de données sur les intensités.

LE SOL

L'eau des précipitations qui parvient à l'interface sol-atmosphère entre en contact d'abord avec la végétation lorsque celle-ci existe, puis avec le sol. Quand la pluie atteint le sol nu, elle le bat. La forte énergie cinétique des gouttes provoque la destruction des agrégats et certaines particules sont déplacées avec les gouttes qui rejaillissent de part et d'autre du point d'impact. Cet effet de la battance et du rejaillissement des gouttes de pluie dépend également de la nature du sol (texture, granulométrie, matière organique, stabilité de la structure). Puis, l'eau de pluie s'infiltré dans le sol ; celui-ci intervient par ses propriétés hydrodynamiques pour régir l'infiltration (état hydrique du sol, réserve en eau, coefficient d'infiltration). Dans les régions à forte agressivité des pluies, l'effet de la battance et du rejaillissement sur l'état de surface du sol est important. La formation de croûte de battance est d'autant plus fréquente que les sols sont plus riches en sables fins, ce qui est le cas des sols ferrugineux des domaines soudaniens ; pour VALENTIN (1985), les sables compris entre 80 μ et 400 μ sont les plus influencés par ces phénomènes. L'action de la battance se traduit également sur l'état de surface ; à la longue, le micro-modèle du sol est modifié ; il y a lissage ou glaçage superficiel. Cette

modification de la rugosité du sol a une incidence sur l'écoulement de l'eau.

Selon qu'il est sec ou humide, le sol ne réagit pas de la même façon aux précipitations. L'infiltration varie en fonction des conditions d'humectation, l'eau peut être stockée dans le sol. L'infiltration de l'eau dans le sol au cours d'une pluie est donc fonction de plusieurs facteurs qui sont :

- l'état hydrique du sol avant la pluie (ce premier facteur dépend des pluies précédentes),
- l'intensité de la pluie, sa durée, l'état de surface et son évolution au cours de la pluie.

La variation du coefficient d'infiltration au cours d'une pluie suit, selon HORTON (1940), une fonction exponentielle décroissante par rapport au temps. Pour des climats tropicaux, il a été constaté que le coefficient d'infiltration devenait très faible après 15 à 20 min. de forte pluie et pratiquement négligeable (quelques mm/h). CASNAVE et VALENTIN (1988) citent, pour différents états de surface, des fourchettes de valeurs du coefficient d'infiltration final également très faibles de l'ordre du mm/h, voire nulles.

L'ÉCOULEMENT

Les études concernant l'écoulement d'une nappe ou d'une pellicule d'eau sur le sol sont peu nombreuses. Les hydrauliciens se sont surtout intéressés à l'écoulement dans des canaux. La formule la plus générale de l'écoulement dans les canaux est due à DARCY ; elle suppose que l'écoulement est uniforme, c'est-à-dire que la perte de charge est due à la pente du canal. La relation s'écrit sous la forme :

$$H/L = (f/4Rh) (V^2/2g)$$

- H/L la perte de charge par unité de longueur, c'est la pente p,
- V la vitesse d'écoulement,
- Rh le rayon hydraulique,
- g la gravité,
- f un coefficient dit de friction.

Pour un plan incliné, le rayon hydraulique Rh correspond à la hauteur de la nappe d'eau. La formule qui lie la vitesse d'écoulement aux différents paramètres peut s'écrire en supposant que le coefficient de friction est une constante et en remplaçant Rh par la hauteur de la nappe H :

$$V = r \cdot (p \cdot H)^{1/2} \quad (1)$$

r est un indice de rugosité qui dépend du coefficient de friction f, de l'accélération de la pesanteur g, des constantes de la formule de DARCY ainsi que des changements d'unités. Il caractérise la rugosité globale de l'interface

sol-atmosphère mouillée par la nappe d'eau, le terme de *rugosité du sol* désignera à la fois la rugosité de la surface du sol proprement dit et la rugosité due à la végétation.

Une telle formule a été proposée par BOZOKY, SZESZICH et KAROKALY (Budapest, 1959), citée par POIRÉE et OLLIER, pour définir l'écoulement d'une nappe d'eau sur le sol.

A partir de la formule de DARCY, MANNING propose pour l'écoulement dans les canaux une formule différente ; en effet, le coefficient de friction ne serait pas une constante et varierait en fonction du rayon hydraulique :

$$v = (1/n) \cdot (Rh)^{2/3} \cdot (p)^{1/2}$$

Le coefficient n dépend de la rugosité, des parois et du fond du canal.

Les deux formules lient la vitesse avec la racine carrée de la pente ; en revanche, la puissance du paramètre hauteur de la nappe d'eau est plus élevée dans le cas de la formule de MANNING.

Ces formules permettent de dégager deux paramètres du ruissellement qui sont la pente et l'état de surface du sol ou rugosité. Mais, elles sont insuffisantes pour permettre la mise en équation de la formation et de l'écoulement d'une nappe d'eau, lors d'une pluie.

FORMULES RATIONNELLES DU RUISSELLEMENT

Pour les calculs qui suivent, seule la première formule sera utilisée ; en revanche, le résultat obtenu à l'aide de la formule de MANNING sera signalé. Le raisonnement est inspiré de POIRÉE et OLLIER et a fait l'objet de développements récents (GUILLOBEZ, 1979 et 1988).

LES DONNÉES

Les lettres suivantes seront utilisées dans les formules :

- K coefficient d'infiltration du sol.
- I intensité de la pluie.
- p pente du sol, pratiquement pente du toit de la nappe.
- l longueur du sol depuis : le faite du versant, un aménagement anti-érosif, le sommet de l'interfluve.
- dl la dérivée de l.
- r indice de rugosité du sol.
- h hauteur de la nappe d'eau ruisselant à la distance l.
- dh la dérivée de h.
- v vitesse d'écoulement de la nappe à la distance l.
- dv la dérivée de v.
- t le temps.
- dt la dérivée de t.
- T la durée de la pluie.
- P la quantité d'eau totale tombée pendant la pluie.

LE RUISSELLEMENT

Nous supposons que le régime de la pluie est permanent, c'est-à-dire que l'intensité de la pluie I est fixe et supérieure à la vitesse de filtration par unité de pente K qui est supposée constante également. La surface du sol est homogène et la pente constante.

A un instant quelconque t après le début de la pluie, à une distance l du faite du versant, la lame d'eau qui ruisselle a une hauteur h ; sa vitesse est v.

Une fraction de temps dt plus tard, cette section d'eau s'est déplacée d'une distance dl ; la vitesse est augmentée de dv et devient v + dv ; la lame d'eau, à cause de l'apport d'eau de pluie reçu sur le trajet de longueur dl, a une hauteur l + dl.

Ces différents paramètres sont représentés sur la figure 1.

Ecrivons l'équation du débit :

$$(v + dv)(h + dh) = vh + (I - K) dl$$

Après développement et simplification, on néglige le terme (dh)(dv) infinitésimal, il vient :

$$hdv + vdh = (I - K) dl \quad (2)$$

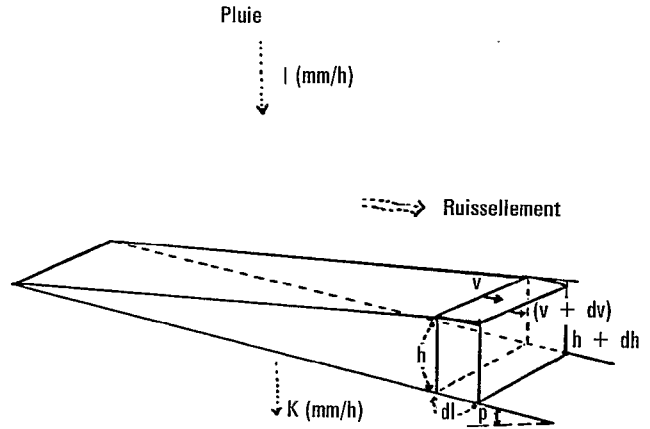


FIG. 1. --- Paramètres du ruissellement.

En utilisant l'une des lois sur l'écoulement citée plus haut, il est possible de poursuivre le calcul.

La formule de DARCY, qui admet l'indépendance du coefficient de friction des autres paramètres, a été utilisée sous la forme proposée par POIRÉE et OLLIER (équation 1).

L'indice r de rugosité a une valeur d'autant plus élevée que la rugosité est faible. Pour cette raison, le terme indice a été préféré à celui de coefficient.

En remplaçant dans l'équation 2 la charge h et sa différentielle dh par leurs valeurs en fonction de v et dv ; il vient :

$$3 \cdot v^2 \cdot dv = (r^2 \cdot p) (I - K) dl$$

Soit en mettant v et dv sous leur forme dérivée par rapport au temps, on obtient :

$$3 \cdot (dl/dt)^2 \cdot (d^2l/dt^2) = (r^2 \cdot p) (I - K) (dl/dt)$$

En simplifiant par (dl/dt), l'équation différentielle est :

$$3 \cdot (dl/dt) \cdot (d^2l/dt^2) = (r^2 \cdot p) (I - K)$$

La première partie de l'équation peut être mise sous la forme de y'y'', qui est la dérivée de y' au carré, divisée par deux.

$$y'y'' = 1/2 \cdot d(y'^2)$$

Soit :

$$3/2 \cdot d(dl/dt)^2 = (I - K) r^2 \cdot p$$

En intégrant une première fois :

$$3/2 \cdot (dl/dt)^2 = (I - K) r^2 \cdot p \cdot t + cte$$

ou :

$$(dl/dt) = (2/3)^{1/2} \cdot (I - K)^{1/2} \cdot r \cdot p^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad (3)$$

Puis une seconde fois, la constante étant nulle :

$$l = (2/3)^{3/2} \cdot (I - K)^{1/2} \cdot r \cdot p^{1/2} \cdot t^{3/2} \quad (4)$$

La relation 3 lie la vitesse v ou dl/dt de la lame d'eau à une distance l du faîte, au temps t .

La relation 4 lie la distance l au temps t .

La vitesse d'écoulement de la nappe à la distance l est fonction des quatre paramètres suivants :

- l'intensité relative de la pluie,
- l'indice de rugosité,
- la pente,
- la durée de la pluie.

Cette vitesse est d'autant plus grande que la pente est forte, la durée de la pluie longue, l'intensité de la pluie forte et la rugosité faible.

La distance du faîte, où la vitesse atteint son maximum à un temps donné, est d'autant plus grande que la pente est forte, la pluie intense et le sol peu rugueux ; cette distance augmente avec la durée de la pluie.

Des formules dérivées peuvent être établies.

Si T est la durée de la pluie, L la distance depuis le faîte jusqu'au lieu où la lame d'eau ruisselant atteint sa vitesse maximale V et où sa hauteur (épaisseur) maximale est H :

$$V^2 = 2/3 \cdot r^2 \cdot p \cdot (I - K) \cdot T \quad (5)$$

$$V^3 = (I - K) \cdot r^2 \cdot p \cdot L \quad (6)$$

$$r \cdot p^{1/2} \cdot H^{3/2} = (I - K) \cdot L \quad (7)$$

$$H = 2/3 \cdot (I - K) \cdot T \quad (8)$$

La formule (6) lie la vitesse V à la distance L du faîte en fin de pluie.

Cette formule sera utilisée dans la suite du raisonnement.

La formule (7) représente la forme de la nappe en fonction de la distance du faîte à la fin de la pluie (cf. figure 2).

A un instant donné la forme du toit de la nappe présente une forme courbe correspondant à l'équation (7) puis, lorsque la distance au faîte devient supérieure à L , le toit de la nappe est parallèle au sol, l'épaisseur correspondant à la relation (8). Cette dernière montre

que la hauteur maximale de la nappe en fin de pluie n'est fonction que de la pluie totale et de la quantité d'eau infiltrée dans le sol pendant la pluie.

Si la formule de MANNING avait été préférée, toutes ses formules auraient la même structure ; par exemple, pour la formule (6), la pente p intervient avec la puissance $3/4$, l'indice de rugosité r avec la puissance $3/2$ et la vitesse v avec la puissance $5/2$; le paramètre $(I - K)$ conservant la même puissance.

L'équation du débit (2) peut être mise sous la forme :

$$d(hv) = (I - K) dl$$

ou encore, dQ étant la dérivée du débit et F une constante :

$$dQ = F(I - K) dl$$

La variation du débit est sous l'influence de la dérivée de la distance dt et de la différence entre l'intensité de la pluie et la vitesse de filtration $(I - K)$ que nous appellerons différentiel hydrique. Ceci suggère que, pour une parcelle de longueur déterminée, la quantité d'eau qui ruisselle lors d'une pluie est fonction du différentiel et de la durée de la pluie.

Le développement mathématique de ces relations n'est pas facile.

Le ruissellement dans son aspect quantitatif global est fonction de la longueur de la parcelle, de la quantité d'eau de pluie et des possibilités d'infiltration d'eau dans le sol ; il semble indépendant de la pente et de la rugosité du sol (dans son aspect friction).

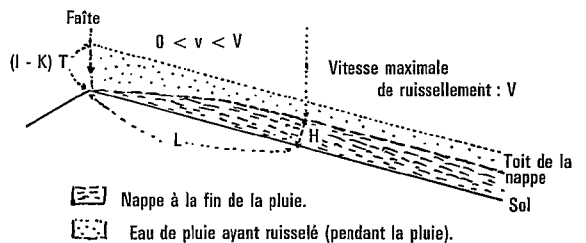


FIG. 2. — Forme de la nappe à la fin de la pluie.

MODALITÉS DE L'ÉROSION ET CONTRÔLE

Seule l'érosion due au ruissellement diffus (TRICART, 1977) sera abordée (écoulement laminaire) ; ce processus de façonnement des interfluves a été appelé morphodynamique pelliculaire (TEISSIER, 1974) et correspond en partie à l'érosion en nappe.

L'ÉROSION

L'érosion des sols est provoquée soit par l'arrachement et le transport des particules de terre par les eaux qui

ruissellent, soit par le transport des particules préalablement séparées par la battance des pluies (érosion pluviale).

L'étude du diagramme de HUIJSTRÖM (figure 3, p. 44) permet de bien poser le problème. La courbe, qui représente les variations du seuil de la vitesse d'arrachement en fonction du diamètre des particules, passe par un minimum d'environ 17 cm/s, cette valeur minimale de la vitesse correspond à des particules comprises entre 0,1 et 0,5 mm (valeur minimale pour un diamètre d'environ

Parcelles de mesure du ruissellement et de l'érosion
Saria, Burkina Faso
Pluie du 11.09.90 : 29 mm, intensité en 30 min. : 50 mm/h.



*Etat de surface du sol en fin d'hivernage : pas de culture, labour, rugosité finale 5,4 mm.
Pluie du 11.09.91 — Rugosité : 6,0 mm — Ruissellement : 16,7 mm — Erosion : 0,54 t/ha.*



*Etat de surface du sol en fin d'hivernage : culture de sorgho, labour et deux sarclages, rugosité finale 23,25 mm.
Pluie du 11.09.91 (avant 2^e sarclage) — Rugosité : 20,1 mm — Ruissellement : 3,0 mm — Erosion : 0,0 t/ha.*

0,3 mm) ; elle est trop élevée pour le type de ruissellement envisagé mais peut être atteinte et dépassée en cas de ruissellement concentré.

La fonction qui lie la vitesse de transport à la dimension des particules est monotone et croissante. La courbe représentative de cette fonction est toujours située en dessous de celle concernant l'arrachement des particules (figure 3) ; la vitesse nécessaire pour le transport des particules de dimension donnée est inférieure à celle qui permet l'arrachement de ces mêmes particules. Une vitesse de l'ordre du cm/s correspond à l'écoulement laminaire ou diffus.

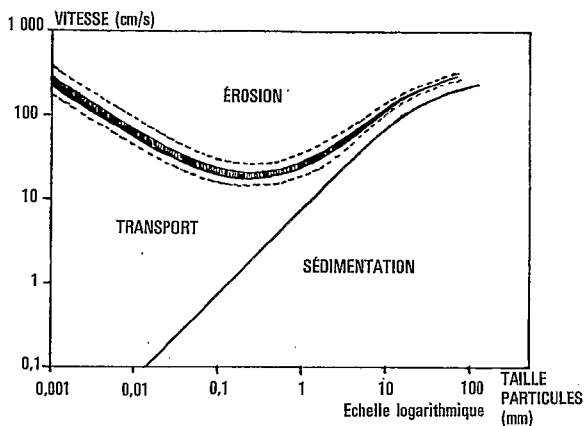


FIG. 3. — Courbes d'érosion et de sédimentation. (Matériau uniforme.) D'après HJULSTRÖM.

Pour une valeur de 5 cm/s, il y a déplacement de particules libres dont la taille est voisine de quelques microns d'après DERRUAU (1962) et de 0,66 mm selon le diagramme de HJULSTRÖM (1935). Cette vitesse de 5 cm/s sera néanmoins utilisée ultérieurement malgré ces imprécisions.

Le ruissellement diffus ne peut éroder le sol que si celui-ci a préalablement été battu par les pluies et que si les agrégats ont été détruits.

C'est donc cette vitesse de transport qui est intéressante à prendre en compte. Au-delà d'un certain seuil, la terre est susceptible d'être entraînée. La valeur de 5 cm/s correspond à des particules fines, des sables fins à moyens.

Les formules (5) et (6) permettent de dégager les paramètres qui influencent la vitesse d'écoulement de la nappe.

Selon la formule 5 ($V^2 = 2/3 \cdot r^2 \cdot p \cdot (I - K) \cdot T$), la vitesse est d'autant plus forte que :

- la rugosité est faible,
- la pente du sol est forte,
- l'intensité de la pluie est forte,
- l'infiltration dans le sol est faible,
- la pluie dure longtemps.

Il découle de ces résultats qu'il est possible d'empêcher

l'érosion en intervenant sur la rugosité et en améliorant l'infiltration de l'eau dans le sol par les façons culturales. Il est envisageable, dans certains cas, de limiter la pente (banquettes, terrassettes). Il n'est, en revanche, pas possible de lutter contre les conditions naturelles (durée de la pluie et intensité).

En plus des facteurs qui viennent d'être évoqués, la formule (6) : $V^3 = (I - K) \cdot r^2 \cdot p \cdot L$ prend en compte la longueur de la parcelle. En effet, la vitesse maximale n'est atteinte qu'au-delà d'une certaine distance. Cette formule présente un grand intérêt pour l'implantation des dispositifs anti-érosifs.

ÉTABLISSEMENT D'UNE FORMULE DÉTERMINANT L'ÉCARTEMENT DES DISPOSITIFS ANTI-ÉROSIFS

Plaçons-nous dans les pires conditions, c'est-à-dire en supposant que le coefficient K est nul, ce qui est rapidement le cas en climat tropical. Dans ces conditions, un dispositif anti-érosif a pour but d'empêcher l'eau qui ruisselle d'atteindre une vitesse érosive. Il est donc nécessaire de placer de tels dispositifs à des distances qui peuvent être estimées par la formule théorique suivante, déduite de la relation (6) pour $K = 0$ et $V =$ constante :

$$L = \Gamma / I \cdot r^2 \cdot p \quad (9)$$

Γ est une constante qui dépend de la vitesse choisie et des unités ; pour 5 cm/s, elle est de 45 000 en tenant compte des unités suivantes (I est exprimé en mm/h, p en %, L et r en système métrique).

Cette formule met bien en évidence le rôle joué par : l'intensité de la pluie, la rugosité du sol et la pente.

Elle se rapproche, pour les pentes faibles, de la plupart des formules empiriques proposées à ce jour, qui prennent en considération la pente et un coefficient souvent arbitraire lié aux conditions climatiques et de sol ; celles-ci sont en fait bien représentées par l'indice de rugosité et l'intensité de la pluie.

Dans une note précédente (GUILLOBEZ, 1988) nous avons proposé de prendre pour I l'intensité en 30 min. à une fréquence donnée qui peut être décennale. Cette intensité permet de se rapprocher de la formule de WISCHMEIER où cet indice sert à la détermination du coefficient d'agressivité des pluies. Cette durée de 30 min. permet de lier les notions d'intensité et de temps.

Cette formule, tenant compte de la pente, de la rugosité du sol et de l'intensité en 30 min. des pluies, a été appelée P.R.I. (Pente, Rugosité, Intensité de la pluie).

COMPARAISON AVEC LES DIVERSES FORMULES

Le graphique de la figure 4 représente diverses courbes P.R.I. en fonction des hypothèses suivantes :

- vitesse seuil 5 cm/s,
- intensité de la pluie 100 mm/h,
- indice r de rugosité variant de 1 (sol très rugueux) à 5 (sol lisse).

En ordonnée L (m), distance entre deux dispositifs anti-érosifs.

En abscisse p (%), pente entre 0 et 10 %.

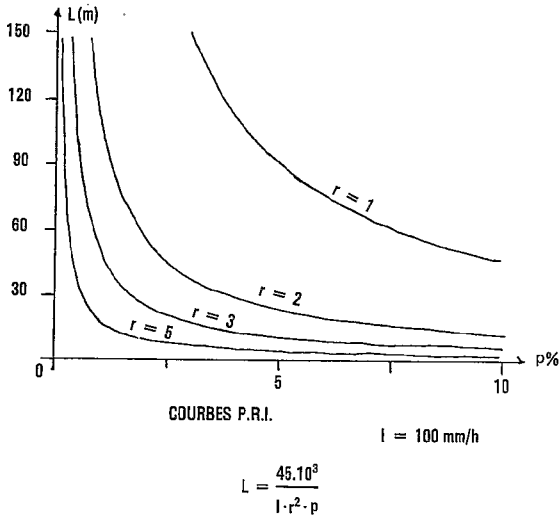


FIG. 4. — Ecartement des dispositifs anti-érosifs.

Les courbes représentées sur la figure 5 ont été tracées en fonction des différentes formules utilisées pour la détermination des dispositifs anti-érosifs ; p, la pente, figure au dénominateur ; les formules sont de la forme :

$$L = a/p^n + b \quad (a \text{ et } b = \text{constantes})$$

La formule de WISCHMEIER est plus complexe.

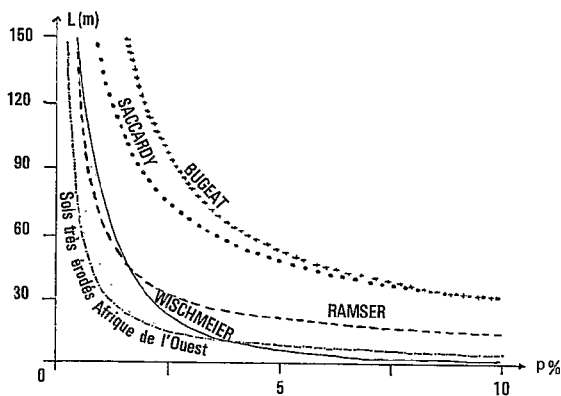


FIG. 5. — Ecartement des dispositifs anti-érosifs.

Dans les conditions choisies ($0 < p < 10\%$), la puissance de p varie selon les auteurs :

- BUGEAT $n = 1$

- SACCARDY $n = 2/3$
- RAMSER $n = 1$
- WISCHMEIER $n = 1, 2 \text{ et } 4$
- AFRIQUE DE L'OUEST $n = 1$
(sols très érodés)

La formule de SACCARDY n'est pas empirique ; elle a été établie par un raisonnement basé sur l'énergie de la lame d'eau ruisselant et tient compte de l'expérience acquise sur des milliers d'hectares (PLANTIÉ, 1960).

Notons que la plupart des courbes utilisent p à la puissance 1 (BUGEAT, RAMSER et Afrique de l'Ouest). La formule de WISCHMEIER est compliquée, p figure au dénominateur avec trois puissances différentes). La courbe représentative a été tracée à l'aide des hypothèses suivantes (conditions de OUAHIGOUYA, au Burkina Faso) :

- R = 350
- K = 0,2 sol ferrugineux
- C = 0,4 culture de mil
- P = 1 pas de pratique anti-érosive.

Les lettres correspondent à la formule de perte en terre de WISCHMEIER ; R est l'indice d'agressivité des pluies, K l'indice d'érodabilité du sol, C l'indice couvert végétal et techniques culturales et P l'indice de conservation de l'eau et du sol (pratiques anti-érosives).

La valeur de perte en terre acceptée a été fixée arbitrairement à 7,5 t/ha. A titre de comparaison à Saria, au Burkina Faso, ROOSE (1974) observe une érosion maximale de 8 t/ha sur sol nu et de 4 t/ha sous culture de sorgho.

Certains aménageurs, dont le souci principal est la conservation des eaux, proposent des dispositifs anti-érosifs très rapprochés, de façon que le sommet d'un cordon pierreux ou d'une diguette corresponde à la base du système situé immédiatement en amont. Un tel dispositif ne repose que sur une vision statique des phénomènes de ruissellement.

Pour une hauteur de 20 cm de l'aménagement, la formule serait en gardant les mêmes unités :

$$L = 20/p$$

Cette courbe encore plus restrictive que les autres n'a pas été tracée.

Par rapport à la formule P.R.I. :

- Les formules de SACCARDY et de BUGEAT sont proches l'une de l'autre pour les fortes pentes ; elles correspondent à un faible indice de rugosité (1,4 à 1,5). Elles ont été établies en Afrique du Nord où les conditions climatiques sont différentes et surtout moins agressives qu'en climat tropical.

- La formule de RAMSER pour les pays tropicaux correspond à des conditions moyennes de rugosité ($r = 2,5$).

- La formule Afrique de l'Ouest (Mémento de l'Agro-nome 1980, sols très érodés, Haute-Volta et Mali) correspond à de faibles rugosités ($r = 3,5$).

● La courbe tirée de la formule de WISCHMEIER est très différente des autres du fait du facteur topographique : elle correspond à une valeur de r d'environ 2,5 pour les pentes inférieures à 2 %, cette valeur augmentant avec les fortes pentes pour atteindre 5 lorsque la pente dépasse 5 %.

La famille de formules proposée permet de tenir compte (comme celle de WISCHMEIER, d'ailleurs, mais d'une façon plus simple) de critères climatiques (intensité de la pluie), d'un seuil de risque (fréquence de retour et vitesse) et d'états de surface (sol et végétation). Sous culture, ce dernier critère varie aux différents stades en fonction du couvert végétal et des façons culturales.

CONCLUSIONS

Cette réflexion, volontairement limitée à des conditions homogènes, permet surtout de mettre en évidence les facteurs qui conditionnent le ruissellement et l'érosion et, ainsi, de mieux choisir les moyens de lutte en fonction des conditions du milieu.

Le ruissellement dans son aspect quantitatif global est fonction de la longueur de la parcelle, de la quantité d'eau de pluie et des possibilités d'infiltration d'eau dans le sol ; il semble indépendant de la pente et de la rugosité du sol, du moins dans son aspect friction.

L'érosion dépend de la violence des pluies et de la susceptibilité des sols à la battance, puis de la vitesse d'écoulement de l'eau qui ruisselle. Le transport des particules est favorisé par une faible rugosité du sol, une pente forte, une intensité de la pluie élevée, une faible infiltration de l'eau dans le sol et la durée de la pluie. La longueur de la parcelle a également une grande importance en liaison avec ces facteurs.

La famille de formules théoriques proposée n'est pas opérationnelle ; pour ce faire, il est nécessaire de conduire des expérimentations en vue de déterminer la constante Γ , qui dépend de la vitesse de ruissellement tolérée et d'un

Les différentes formules rationnelles qui ont été établies montrent que l'étude du ruissellement doit se faire sur des dimensions de parcelles adaptées aux conditions climatiques et de sol (rugosité). Le ruissellement pour une pluie est maximale au début de la parcelle, puis se stabilise à une distance qui est fonction de ces conditions.

Il est difficile d'évoquer un « facteur d'échelle » entre des parcelles de tailles variées puisqu'à chaque pluie correspond une longueur spécifique de parcelle. Les parcelles expérimentales doivent être assez longues afin de pouvoir bien étudier le ruissellement.

facteur rugosité qui reste à formuler. Il est d'usage de déterminer la rugosité du sol nu par le calcul de l'écart-type de différentes mesures du niveau de la surface du sol par rapport à une ligne de référence.

D'après les travaux de BOZOKY et *al.*, le carré de l'indice de rugosité (r) présente une grande plage de variations (1 à 25) alors qu'en climat tropical, par exemple, l'intensité de la pluie varie dans un rapport nettement plus faible.

Cette réflexion permet, par ailleurs, de dégager et de hiérarchiser les grands sujets d'étude en ce qui concerne la lutte contre l'érosion et la conservation des eaux en climat très agressif et sur un sol très riche en limons grossiers et sables fins.

Ces sujets sont par ordre d'importance décroissante :

- la protection du sol contre la battance et le rejaillissement,
- le maintien d'une rugosité importante au cours de la culture,
- l'utilisation de dispositifs anti-érosifs adaptés aux conditions climatiques, de sol et aux systèmes de cultures.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- CASENAVE (A.), VALENTIN (C.), 1988. — Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. ORSTOM, CEE, 201 p.
- MINISTÈRE DE LA COOPÉRATION, 1980. — Mémento de l'Agro-nome, 3^e édition, planche 7, p. 263.
- DERRUAU (M.), 1962. — Traité de géomorphologie, 3^e édition, Masson, Paris.
- GALABERT (J.), MILLOGO (E.), 1972. — Indice d'érosion de la pluie en Haute-Volta. CTFT, Ouagadougou, 57 p.
- GUILLOBEZ (S.), 1979. — Les milieux vertiques du bassin de la Volta Blanche dans la région de Bagré (Haute-Volta). *Agro. Trop.*, vol. XXXIV, n° 1, pp. 23-39.
- GUILLOBEZ (S.), 1988. — Formule simple d'écartement de dispositifs anti-érosifs. CIRAD/IRAT/DRN, Montpellier, 9 p.
- HJULSTRÖM (F.), 1935. — Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Bull. Reprint. from Bull. Geo. Inst. Univ. of Upsala, Almqvist & Wiksells Boktryckeri-A-B, 527 p.
- HORTON (R. E.), 1940. — An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 5, pp. 399-417.
- PLANTIE (L.), 1960. — Techniques françaises algériennes de banquettes de défense et de restauration de sols. Colloque sur la conservation et la restauration des sols, Téhéran. Institut Français de Coopération Technique - Faculté d'agronomie de Karady, pp. 237-266.

- POIRÉE et OLLIER, 1978. — Assainissement agricole, 5^e édition - Les rapports du sol et de l'eau, Ruissellement de l'eau sur le sol, pp. 63-70.
- ROOSE (E.), ARRIVETS (J.), POULAIN (J.-F.), 1974. — Etude du ruissellement, du drainage et de l'érosion sur deux sols ferrugineux de la région centre Haute-Volta. IRAT/ORSTOM, 73 p.
- ROOSE (E.), 1979. — Pédogenèse actuelle d'un sol ferrugineux issu de granite sous savane arborée du plateau Mossi (Haute-Volta). Gorse, campagne 1968-1974, ORSTOM, Adiopodoumé.
- TEISSIER (J.), 1974. — Terroir de Mogtedo. L'Agron. Trop., vol. XXIX, 2-3.
- TRICART (J.), 1977. — Précis de Géomorphologie, Tome 2.
- Géomorphologie dynamique générale, SEDES, Paris, 345 p.
- VALENTIN (C.), 1985. — Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de régions subdésertiques (Agadez - République du Niger). Editions de l'ORSTOM, collection étude et thèses, Paris.
- WISCHMEIER (W. H.), 1960. — A rainfall erosion index for a universal soil loss equation. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc., 24, pp. 322-326.
- WISCHMEIER (W. H.), SMITH (D. D.), 1965. — A universal soil loss estimating equation to guide conservation farm planing. Trans. 7th Inter. Congr. Soil. Sci., 1, pp. 418-425.

BOIS TROPICAUX AU JARDIN DU LUXEMBOURG À PARIS

Les bois tropicaux seront à l'honneur à l'Orangerie du Jardin du Luxembourg du 18 septembre au 23 septembre prochain.

Dans le cadre de son Exposition d'Automne, qui se tient chaque année à la fin de l'été sous le haut patronage de Monsieur Alain POHER, Président du Sénat, le Jardin du Luxembourg a choisi cette fois-ci de mettre en lumière les plantes, peu connues du grand public, qui fournissent les bois tropicaux.

A partir de la remarquable collection des bois exotiques de la ville de Nantes, plantés en pot dont certaines ont plus de 50 ans et qui seront exposées à cette occasion pour la première fois à Paris, les principales essences exotiques utilisées de nos jours dans l'industrie du bois seront présentées, en développant pour chacune d'entre elles deux aspects principaux :

- la plante : description et écologie ;
- son bois et ses principales utilisations.

Grâce à la participation du C.T.F.T., du Musée National des Arts et Traditions Populaires et de la Fédération Compagnonnique des Métiers du Bâtiment, de nombreux spécimens et objets d'art réalisés avec ces bois seront exposés et commentés.

L'exposition est ouverte tous les jours de 9 h 30 à 18 h 30 du mercredi 18 septembre au lundi 23 septembre 1991 inclus (ouverture exceptionnelle à 14 h le 18 septembre). L'entrée est gratuite.

Orangerie du Jardin du Luxembourg, angle rue de Vaugirard, rue Guymer, 75006 Paris.

Métro : Saint-Sulpice ou Odéon. Bus : n° 58-84-89.