

L'HYDRAULIQUE DU RUISSELLEMENT EN NAPPE MINCE
SUR UN LOESS NU ET SOUS COUVERTURE STEPPIQUE SIMULEE
AU LABORATOIRE

par

J. Savat *

ABSTRACT

Experiments on loess, carried out in a flume with a length of four metres and width of forty centimetres have revealed that the erosion of a bare loess surface is strikingly different from that when the loess was covered with a simulated steppe vegetation of *Poa annua L.*

The rate of erosion with rainfall and overland flow is always greater than with overland flow alone at the same total discharge. The differences are relatively more important for the lowest slopes of a few degrees. For a 10° slope, the relative difference between the two rates of erosion is reduced to 1,5 times only, while it is about 4 times for slopes lower than 5° .

The effect of the vegetation on the flow is i. reducing its velocity more than three times and ii. increasing the thickness of the water film in the same proportion. One can calculate that the reduction of the shear velocity will be considerable.

As it could be expected, that rate of erosion on the vegetated surface exceeds that of the bare loess several times until the slope reaches 5° . For such a slope value, standing waves occur on the bare surfaces, rills are starting and the increase of the erosion with the slope is decreasing, probably because the friction factor of the flow becomes lower while it is supercritical.

Photographs have revealed the existence of numerous vortices originating around the grass blades. One must accept that these vortices become very aggressive at higher slopes so that the sum of their activity might equal - or even exceed - the activity of the turbulent shearing stress of the water that flows on the bare surface.

* Laboratorium voor Experimentele Geomorfologie, Redigenstraat 16 bis, LEUVEN, Belgique.

INTRODUCTION

Des expériences faites au laboratoire avaient pour but d'étudier l'influence de la rugosité sur l'écoulement d'une nappe mince d'eau. Puisque quelques études ont déjà été faites sur des surfaces peintes ou non naturelles (YONG NAM YOON and H.G. WENZEL, 1971 ; E.T. SMERDON, 1966) il avait été jugé préférable de choisir un substrat naturel, même au prix de la perte d'une certaine exactitude due à l'irrégularité de la surface employée. Dès lors, il était indiqué de mesurer la charge de l'eau en matières solides puisque cette mesure ne nécessitait qu'un petit travail supplémentaire.

DESCRIPTION DES EXPERIENCES

Le bac d'essai dans lequel les expériences étaient faites mesure quatre mètres sur quarante centimètres. Il peut être incliné jusqu'à une pente maximale de seize degrés. Il est construit en aluminium et en plexiglass mais repose sur un pont qui ne fléchit pas. Le débit terminal qui est pompé à son extrémité amont passe par un récipient troué qui est intercalé afin de réduire le degré de turbulence que l'eau possède dans le tuyau adducteur. La pompe employée donne un débit maximal de 7 litres par minute.

Un simulateur de pluie, qui a les mêmes dimensions que le bac d'essai, produit des gouttes de 4,17 mm de diamètre qui atteignent environ deux tiers de leur vitesse terminale, soit environ six mètres par seconde (J.O. LAWS, 1941). Le simulateur est soumis à une pression hydrostatique constante qui est maintenue dans un tonneau accroché au plafond du laboratoire ; un trop-plein y maintient le niveau de l'eau à une hauteur constante. Six trop-pleins permettent de varier l'intensité de la pluie entre 17 et 88 mm par heure.

Le débit total sortant du bac d'essai était enregistré avec un enregistreur potentiométrique qui était connecté à un déversoir étalonné.

La vitesse superficielle de l'eau était mesurée par voie photographique. Les traceurs photographiés étaient des petits disques d'argents, d'un diamètre de quatre millimètres et d'une épaisseur de un dixième de millimètre qui flottent sur les films les plus minces. Le temps d'exposition a varié de une à un huitième de seconde en fonction des vitesses de l'eau.

Les disques s'observent sur les photographies (Photo 1) comme des traits dont la longueur - moins la largeur - est proportionnelle à la vitesse de l'eau.

De la farine a été aussi répandue sur l'eau. Elle ne permet pas d'en calculer la vitesse mais elle donne une image de l'écoulement, par exemple s'il est rotationnel ou irrotationnel. La seconde photographie montre ainsi clairement l'existence de tourbillons.

La charge de l'eau est déterminée par simple évaporation d'échantillons d'un demi-litre. Aucune granulométrie du matériel érodé n'a été faite.

Du loess éolien couvrait le bac d'essai sur une épaisseur de sept centimètres. Son diamètre médian est de 27 microns et sa teneur en argile est de huit pour cent. Il contient une fraction sensiblement égale de sable très fin. Quoiqu'il soit peu perméable à l'eau ($k = 10^{-5}$), celle-ci percole lentement ce qui oblige à drainer le fond du bac par une tuyauterie perforée couchée sur le fond. Cette tuyauterie est recouverte d'un tissu qui laisse percoler l'eau mais qui empêche son enlèvement.

Une partie des expériences ont été faites sur le loess non couvert tandis qu'une seconde série d'expériences se sont faites lorsque le bac était couvert d'une steppe simulée, composée par des brins de *Poa Annua*, L. semés depuis deux mois (Photos 1 et 2). Sur ces deux substrats, le ruissellement a été alimenté soit par la pompe seulement (ruissellement terminal), soit par le simulateur (ruissellement pluvial) ; soit par les deux sources (ruissellement mixte).

RESULTATS

A. Les vitesses superficielles.

La vitesse de l'eau est toujours plus grande, à pente égale et à débit égal, lorsque l'écoulement est terminal. Le décalage entre la vitesse expérimentale et celle de l'écoulement pluvial augmente avec la pente. Aucune différence marquée n'a été observée sur une pente de 0,5 degré, mais la différence augmente progressivement pour atteindre quarante pour cent sur une pente de huit degrés (J. SAVAT, 1975). La vitesse du ruissellement mixte est intermédiaire vis-à-vis des deux précédentes. Il a été observé pour tous les modes de ruissellement, que la vitesse s'accroît avec la racine carrée de la pente lorsque celle-ci environne un degré et que cette proportionnalité décroît lentement jusqu'à la racine cubique seulement lorsque la pente a atteint huit degrés environ.

Les mesures de la vitesse sur le loess couvert par la pseudo-steppe ont été moins précises mais une dizaine de valeurs ont conduit à l'estimer à un quart seulement des vitesses atteintes sur le loess nu.

B. L'image de l'écoulement

1. Le loess non couvert

Lorsque la pente avoisine un degré, l'eau serpente en aval. Sur des pentes de trois degrés, elle coule perpendiculairement à la pente générale du bac d'essai, donc parallèlement à ses parois. En même temps apparaissent des ondes stationnaires qui sont à l'origine d'ondulations du sol. La longueur d'onde et l'amplitude de ces ondulations s'amplifient lorsque la pente augmente. Ainsi s'amorce le creusement d'une rigole. Généralement l'érosion en nappe est remplacée par une autre en rigoles vers les six degrés.



Photo 1 : La végétation steppique simulée. Les traits représentent des disques flottants d'argent photographiés avec un temps d'exposition de 1/4 de seconde. Débit terminal et pente de cinq degrés.



Photo 2 : La farine donne une image de l'écoulement. La grande flèche indique le sens de l'écoulement et les petites flèches indiquent des tourbillons.

2. Le loess sous la steppe simulée

La végétation freine la vitesse de l'eau et, par conséquent, en augmente la profondeur. La naissance des ondes stationnaires est ainsi empêchée. Par contre, lorsque la pente est de quelques degrés on peut assister à la naissance de tourbillons auprès des tiges de l'herbe (Photo 2). L'agressivité de ces tourbillons, pour des pentes importantes, sera démontrée plus loin.

C. La charge de l'eau en matériaux érodés

1. Observations sur le ruissellement pluvial (Fig. 1)

1°) Lorsque l'intensité de la pluie est augmentée sur le loess couvert, la charge de l'eau s'accroît à peu près proportionnellement à l'intensité de la pluie.

2°) L'équation de la charge en fonction de la pente s'écrit, pour la charge atteinte sur le loess couvert sous une pluie de 56 mm par heure, comme suit :

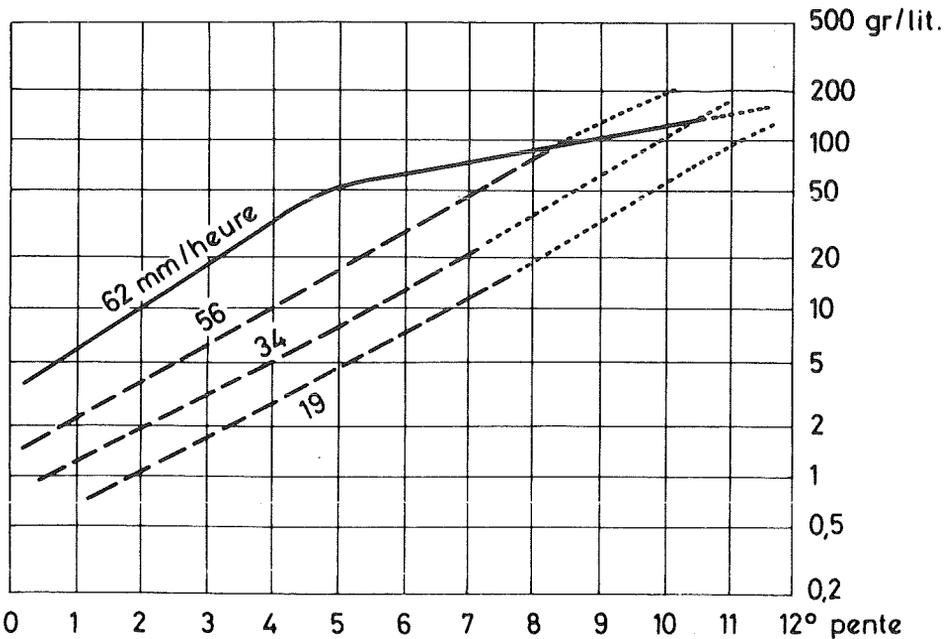


Fig. 1 : La charge de l'eau ruisselante pluviale (en gr/lit.) en fonction du degré de la pente pour le loess nu (trait plein) et pour le loess sous couverture steppe (traits en tirets).

$$\log C = 0,12 + 0,22364 a$$

$$\ln C = 0,2763 + 0,51494 a$$

$$C = e^{(0,2763 + 0,51494 a)}$$

$$C = e^{(0,2763 + 0,29204 S)}$$

$$\text{puisque } \ln X = 2,3 \log X$$

$$\text{puisque } a \approx 1,746 S$$

lorsque : C égale la concentration en matériaux érodés en grammes par litre d'eau ruissellée, log signifie les logarithmes de Briggs et ln ceux de Napier, e est la base des logarithmes népériens, a la pente en degrés et S la pente exprimée en pour cent. Il s'ensuit que la charge augmente d'une façon accélérée avec la pente. Lorsque cette dernière est de un pour cent, la charge s'accroît en augmentant de 0,292 la puissance de e et que lorsqu'elle augmente jusqu'à 3,4 pour cent, cette puissance vaut exactement un. Elle atteindra quatre lorsque la pente est de treize pour cent (huit degrés environ).

Une comparaison avec la littérature a appris que W.H. WISCHMEIER et D.D. SMITH (1965) proposent une érosion accélérée avec la pente. Elle serait proportionnelle à $0,43 + 0,8 S + 0,043 S^2$ lorsque la pente est exprimée en pour cent. Les équations dérivées des formules établies pour des rivières mènent à des relations exponentielles.

3°) A intensité de pluie égale, la charge de l'eau est quatre fois plus importante sur le loess nu que lorsqu'il est couvert. Ceci est valable jusqu'à une pente de cinq degrés. Au-delà, la croissance accélérée sur le loess couvert continue tandis qu'il y a une rupture nette dans le rythme de l'accroissement sur le loess nu. La conséquence est que l'égalité des charges est atteinte pour une pente entre huit et neuf degrés ! Si les courbes relatives aux intensités plus faibles sont extrapolées, l'égalité des charges se produira pour des pentes légèrement supérieures, c'est-à-dire vers onze degrés.

2. Observations sur le ruissellement terminal (Fig. 2)

Environ 37 pour cent de la pluie est éjectée hors du bac d'essai et ne contribue donc pas au ruissellement mesuré. Une intensité de 62 mm/heure produit ainsi un ruissellement de 1,04 l/min. Si on définit ainsi les débits on peut dire qu'à débit égal, le ruissellement terminal érode quatre fois moins que le débit pluvial lorsque la pente est de deux degrés. Cette différence s'atténue progressivement et est réduite à une fois et demi à dix degrés.

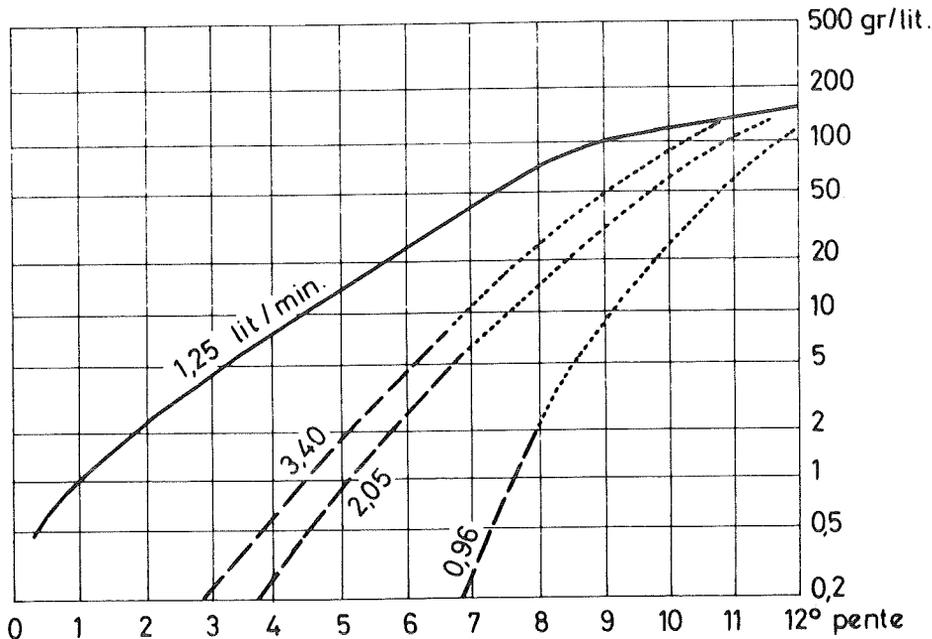


Fig. 2 : La charge de l'eau ruisselante terminale (en gr/lit.) en fonction du degré de la pente pour le loess nu (trait plein) et pour le loess sous couverture steppique (traits en tirets). Les lignes pointillées sont des extrapolations probables.

Sur le bac couvert de végétation, cette même différence est encore plus grande sur des faibles pentes mais, en contrepartie, elle tend à se réduire plus rapidement.

La comparaison des charges de l'eau atteintes avec un ruissellement identique sur le bac couvert et le bac nu, mène toutefois à des conclusions semblables à celles obtenues avec la pluie. En effet, l'érosion du bac couvert atteint ou pourrait dépasser celle du bac nu sur des pentes fortes d'environ dix degrés.

D. Interprétation des mécanismes

Une série d'expériences au laboratoire, dans un chenal de 10 cm de largeur visait à établir une relation entre la profondeur de l'eau, la pente et la vitesse moyenne. La profondeur de l'eau a été mesurée avec un micromètre ; les mesures ont été contrôlées avec une balance qui permet de peser la quantité d'eau contenue à un moment donné dans un bac d'essai. Les données coïncident très bien. Ainsi, si la pente est de 1,5 pour cent, et la profondeur de l'eau (d) de 3 millimètres, sa vitesse moyenne atteint 19,2 cm/sec. sur le

loess dont le diamètre D_{65} est de 30 microns, soit un peu plus que la médiane. Si d_{lam} est l'épaisseur du film laminaire au-dessus duquel l'écoulement est turbulent, ν la viscosité cinématique de l'eau, v_0 la vitesse tractrice sur le fond, x un coefficient de correction qui dépend de la relation D_{65}/d_{lam} , l'épaisseur du film laminaire peut être calculée d'après les deux expressions suivantes :

$$d_{lam.} = 11,5 \nu / v_0 \quad (1)$$

$$\nu / v_0 = 5,75 \log \frac{12,27 x \cdot d}{D_{65}} \quad (2) \text{ (G.H. KEULEGAN, 1938)}$$

Plusieurs calculs sont nécessaires pour que ces équations implicites soient résolues et le résultat n'est qu'un ordre de grandeur dû à l'imprécision du paramètre x . Dans l'exemple cité ci-dessus, si x vaut 0,1, $\nu / v_0 = 12$. Dès lors, $v_0 = 1,6$ cm/sec et d'après (1) $d_{lam} = 11,5 \cdot 10^{-2} / 1,6 = 0,072$ cm, puisque toutes les valeurs sont exprimées en unités c.g.s.

Il s'ensuit qu'un quart du film d'eau connaît un écoulement laminaire et que les grains du loess sont bien englobés dans ce film qui mesure vingt-quatre fois leur diamètre. Aucun grain n'est transporté lorsque la surface est lisse, c.à.d. là où elle est plane.

L'amincissement du film laminaire exposera les grains aux fluctuations de vitesse de la couche turbulente. Lorsque la pente double, l'épaisseur du film laminaire diminue de moitié environ et de plus en plus de grains de loess seront pris dans la couche turbulente. Les gouttes de pluie traversent ce film protecteur et leur impact est quasi indépendant de la pente. Leur influence relative sur l'érosion diminue lorsque le contact entre le loess et l'eau est de plus en plus turbulent (cf. ci-dessus).

Des expériences avec une surface sableuse ($D_{50} = 230$ microns) démontrent que la pluie n'augmente que peu la force érosive de l'eau. C'est parce que l'impact des gouttes freine la vitesse moyenne de l'eau et parce que les grains de sable sont déjà rapidement pris dans la couche turbulente.

Surprenant a été le rôle de la végétation parce que celui-ci ne se traduit pas aisément dans une formule. Les tourbillons nés près des brins d'herbe deviennent agressifs vers cinq degrés lorsqu'ils tournent suffisamment rapidement pour traverser la couche laminaire. Le mécanisme des tourbillons est parfois mis en évidence mais il n'est pas compris.

Des éléments de rugosité sur la surface sableuse n'en accélèrent pas l'érosion. Il est probable que les tourbillons naissent plus difficilement sur cette surface rugueuse et que leur action éventuelle est dépassée en importance par la force tractrice du courant. Les pierres qui étaient couchées sur le sable ont retardé parfois l'écoulement et diminué légèrement l'érosion.

CONCLUSIONS

L'érosion d'une surface meuble par un film d'eau mince est un terme qui masque des mécanismes différents. Si l'érosion ne dépend que de la force tractrice exercée par l'eau courante il est incompréhensible qu'une surface partiellement couverte de végétation puisse, sous certaines conditions, posséder une plus grande susceptibilité à l'érosion qu'une même surface entièrement découverte. Mais tout en diminuant la vitesse et la vitesse tractrice, la végétation peut induire un mécanisme d'érosion qui dépasse en intensité l'arrachement des grains de loess dans la couche turbulente.

L'effet de l'impact des gouttes de pluie sur l'érosion diminue relativement si d'autres processus tendent à incorporer des grains dans la couche turbulente de l'eau.

Si un bac de loess est parfaitement aplani lorsque le ruissellement démarre, il se peut qu'aucune érosion ne s'amorce avant que la pente n'atteigne cinq degrés tandis qu'un sable est déjà soumis à une érosion intense. Il semble donc que le diagramme que F. HJULSTRÖM (1935) a construit pour les rivières pourrait être utilisé pour des films d'eau très minces à condition d'en adapter l'ordonnée.

BIBLIOGRAPHIE

- HJULSTROM, F. (1935).- Studies of the Morphological Activity of River as illustrated by the River Fyris. *Bull. Geol. Instit. Uppsala*, v. 25, pp. 221-527.
- KEULEGAN, G.H. (1938).- Laws of Turbulent Flow in Open Channels *Journ. Res. Natl. Bur. Standards*, Research Paper 1151, v. 21, pp. 707-741.
- LAWS, J.O. (1941).- Measurements of the Fall-Velocity of Water-Drops and Raindrops. *Trans. Americ. Geophys. Union*, v. 22, pp. 709-721.
- SAVAT, J. (1975).- Discharge Velocities and Total Erosion of a Calcareous Loess : a Comparison between Pluvial and Terminal Run-off. *Revue de Géom. Dynamique* (en préparation).
- SMERDON, E.T. (1966).- Effect of Rainfall on Critical Tractive Force in Channels with Shallow Flow. *Trans. American Society of Agricultural Engineers*, v. 9, pp. 343-346.
- WISCHMEIER, W.H. and SMITH, D.D. (1965).- Rainfall Erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains. *U. S. Dept. Agriculture*, Washington D.C., Handbook 282.
- YONG NAM YOON and WENZEL jr., H.G. (1971).- Mechanics of Sheet Flow under Simulated Rainfall. *Proceeding of the Amer. Society of Civil Engineers, Jour.*, n° HY 9, pp. 1367-1386.

DISCUSSION

- M.A. Stocking** : In the rainfall simulator experiments the maximum intensities used by Savat are 56 mm/h. I wonder if this is sufficient and whether they were continued for long enough. In the subtropics maximum intensities have been recorded of 200 mm/h for 5 minutes and 100 mm/h for 5 minutes can be expected for many places each year as many as three or four times. Since these high intensities are not unusual it may be that experiments should be continued to see if equilibrium conditions are upset.
- J. Savat** : Sometimes, in order to find a relationship between erosion, slope, infiltration and time, the rainfall experiments were conducted over up to 7 hours. When no rills originated the scatter of the concentrations, taken with 1 hour intervals, was low. But in a run one does not bring in a real soil but a regolith.
- J. Alexandre** : Quelle est la relation entre les tourbillons et la couche laminaire ?
- J. Savat** : La vitesse de l'eau augmente inversement au rayon de courbure du tourbillon. A partir d'un rayon critique, la vitesse aura éliminé la couche laminaire dont l'épaisseur est par ailleurs fonction de la dimension des grains de la partie superficielle du sol.
- O. Slaymaker** :
- 1) What intensities of precipitation did you use and over that periods of time were they maintained ?
 - 2) What is the effect of the large raindrop diameter used ?
- J. Savat** :
- 1) The intensities were varied from 18 to 64 mm/h. They were maintained for up to half an hour on the same slope.
 - 2) Since the raindrops had all approximately the same diameter of about 4 mm we could not compare with smaller drop impacts.
- H. Mensching** : Des intensités de pluies de l'ordre de 50 à 100 mm/h sont fréquentes pendant la saison des pluies et cela pour des durées de 10 à 30 minutes. Quelle est la relation entre les fréquences de telles pluies et l'érosion effective exercée sur des sols de steppe ou de savane ?
- J. Savat** : Je n'ai pas encore consulté de données météorologiques dans le but de calculer l'ablation d'un versant puisque je n'ai pas encore une idée exacte de l'accroissement du volume d'eau ruisselé en fonction de la longueur de la pente. L'influence de l'augmentation de la charge, qui s'observe en laboratoire, n'est pas encore précisée non plus.
- I. Douglas** : Did you run your experiments for longer than 50 minutes at low rainfall intensities, such as 20 mm/h, as such intensities and durations of precipitation frequently occur in nature ?
- J. Savat** : I tried to establish a relation between slope and load of the run-off water and therefore the experiments were done as quickly as possible in order to prevent a big change in the microtopography of the run.

Cit. Kabondo Kalubi :

- 1) Dans la formule $v = q/d$, q n'a pas les dimensions d'un débit.
- 2) Comment expliquer que d'après la formule reprise plus haut v soit inversement proportionnel à d et que dans les courbes v/d , v varie au contraire dans le même sens que d .

J. Savat :

- 1) De fait, q représente un débit par unité de largeur.
- 2) v et d augmentent en même temps lorsque q augmente, ce qui est le cas dans les courbes v/d du graphique. Toutefois, si q reste constant, v variera en fonction inverse de d .