

Etude des effets des puissances érosives de pluie et de ruissellement sur l'érosion d'un sol agricole remanié

L. Mouzai, M. Bouhadeff

Laboratoire LEGHYD, Faculté de Génie Civil, USTHB Bab-Ezzouar 16111, Alger, Algérie.
e.mail: mouzail@yahoo.fr & mbouhadeff@usthb.dz

Abstract

The object of this investigation is to assess the relationships between the rainfall power, overland flow power and soil erosion. To realize this assessment, an agricultural sandy soil, rainfall simulator and soil tray were used.

The results found were analysed statistically and plotted on figures. The relationship between the sediment concentration and rainfall intensity is represented by a power function with a high coefficient of determination. The 'b' coefficient of this function is clearly representing the soil characteristics. The second relationship, between the sediment concentration and rainfall power, evolves in the same way as the rainfall intensity following the power function. The rainfall power gathers most of the rainfall characteristics, which give the reason to consider this parameter as a dominant and erosive factor.

As regards, the overland flow power, sediments concentration evolves in an exponential function with this parameter giving an important coefficient of determination. Overland flow erosive power depends on the soil slope, on flow discharge, on flow density and on soil type.

Résumé

L'objectif de cette étude est d'évaluer les relations entre la puissance érosive de pluie et la puissance érosive de ruissellement avec l'érosion du sol. Pour réaliser cette évaluation, un sol agricole sableux, un simulateur de pluie et un bac de sol ont été utilisés. Les résultats sont illustrés par des figures et analysés statistiquement. La relation entre la concentration des sédiments et l'intensité de pluie suit une fonction puissance avec un important coefficient de détermination. Le coefficient 'b' de cette fonction représente bien les caractéristiques du sol. La deuxième relation, entre la puissance érosive et la concentration des sédiments, suit également une fonction puissance et évolue de la même manière que l'intensité de pluie. Cette puissance comprend les caractéristiques de la pluie, ce qui conforte la raison de considérer ce paramètre comme un facteur dominant de l'érosivité. En ce qui concerne la puissance érosive de ruissellement, la concentration des sédiments évolue exponentiellement avec ce paramètre, avec un coefficient de détermination important. La puissance érosive est fonction de la pente, du débit, de la densité et du type de sol.

Mots-clés : Pluie, Ruissellement, Puissance érosive, Erosion, Sol agricole.

1-Introduction

L'érosion hydrique du sol, provoquée par les précipitations de pluie, se manifeste dans la dépense de l'énergie des gouttes de pluie et l'énergie de ruissellement sur l'arrachement et le transport des particules du sol. La combinaison des forces érosives de la goutte de pluie et de l'écoulement, dépendant du rapport entre le diamètre de la goutte de pluie et la profondeur de ruissellement, est le sous-processus le plus sensible et complexe du phénomène de l'érosion du sol. Dans ce sous-processus, l'hydraulique commence à prendre place différemment et se complique de plus en plus. L'étude des effets des paramètres érosifs de la pluie sur l'érosion nécessite la connaissance de plusieurs facteurs déterminants : masse des gouttes, dimension des gouttes, distribution, forme, vitesse terminale et direction de chute [11, 9, 8]. La dépendance de la puissance érosive de ces paramètres peut élargir la compréhension de l'érosion du sol.

Plusieurs équations ont été proposées pour quantifier l'érosion des inter-rigoles et des rigoles pour lesquelles la vitesse de cisaillement hydrique est le facteur dominant. Plusieurs auteurs ont relié le détachement et le transport des particules du sol à la vitesse de cisaillement [11, 1, 6, 18]. Certains auteurs, après avoir analysé leurs résultats, sont arrivés à conclure que la puissance de l'écoulement est le meilleur prédicteur de l'érosion [19]. Ce paramètre a été relié à l'érosion du sol sous forme de puissance de l'écoulement, puissance unitaire de l'écoulement et puissance effective de l'écoulement [20, 10]. Vu l'importance de ce paramètre, la puissance érosive de ruissellement peut être utilisée pour évaluer l'érosion d'un sol agricole.

L'objectif de cette investigation est d'évaluer la puissance érosive de pluie, la puissance érosive de ruissellement, quantifier les pertes en sol en utilisant un sol agricole et des intensités de pluie semblables à celles qui existent réellement et relier les deux puissances érosives à l'érosion du sol pour déterminer les effets de la pluie et de ruissellement sur un sol agricole.

2- Théorie

2.1- Détermination de l'expression de la puissance érosive de pluie

Les effets de la pluie sur l'érosion peuvent être représentés par la hauteur, l'intensité, la vitesse, l'énergie cinétique, la quantité de mouvement et finalement par la puissance de la pluie. Dans les travaux de Shih et Yang [21], Schmidt [22], les auteurs ont relié la vitesse des gouttes de pluie à l'intensité de la pluie par l'expression suivante :

$$V_i = 6.6i^{0.07} \quad (1)$$

Gabet et Dunne [7] ont donné l'expression de la puissance de la pluie comme suit :

$$P_i = \frac{\rho i V_i^2 \cos \theta}{2} \quad (2)$$

V_i est la vitesse de l'écoulement (m/s), i est l'intensité de pluie (m/s), P est la puissance de pluie ($\text{kg/s}^2/\text{s}$), ρ la masse volumique de l'eau (kg/m^3) et θ l'angle de la pente du terrain. Ces deux expressions ont été exploitées par [21] pour étudier l'estimation de la capacité d'un écoulement érosif en utilisant la puissance unitaire d'un écoulement.

2.2-Détermination de l'expression de la puissance érosive d'écoulement

Pour déterminer l'expression de la puissance de l'écoulement sur une surface de terre agricole, le choix s'est porté sur la méthode d'Elliot et Laffin [2] qui estiment que l'énergie perdue par l'eau érodant une rigole E , est le produit de la masse d'eau m_e , de la variation d'élévation Δh entre deux positions le long d'une rigole et de l'accélération g de la pesanteur.

$$E = m_e \cdot \Delta h \cdot g \quad (3)$$

Le taux de la dissipation d'énergie ($\partial E / \partial t$) peut être évalué par la dérivation de l'équation (3) :

$$\frac{\partial E}{\partial t} = g \frac{\partial m_e}{\partial t} \Delta h \quad (4)$$

Le taux de variation de l'énergie avec le temps représente la puissance de l'écoulement :

$$\Omega = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (5)$$

La perte de charge est le produit de la longueur L de la rigole et de la pente S ($S = \sin \theta$).

$$\Delta h = LS \quad (6)$$

La variation de la masse de l'eau est le produit de la masse volumique et de la variation du volume, la variation du volume étant le débit Q.

$$\frac{g \cdot \partial m_e}{\partial t} = \frac{\gamma_e \cdot \partial V_e}{\partial t} \quad (7)$$

La combinaison des équations 4, 5, 6 et 7 donne l'expression suivante :

$$\Omega = \gamma_e Q L_e S \quad (7a)$$

Divisant l'équation (7a) par la longueur L, et la largeur w, de la rigole, on obtient la puissance dissipée par unité de surface projetée de la rigole :

$$\Omega = \gamma_e Q S / w_r \quad (7b)$$

Cette puissance s'écrit :

$$\Omega = \rho g q S \quad (8a)$$

Elle peut également prendre la forme suivante :

$$\Omega = \tau v \quad (8b)$$

τ est la tension de frottement et v la vitesse de ruissellement.

Dans notre cas, l'écoulement sur une surface agricole est un écoulement d'un mélange eau/sédiments,

ce qui modifie l'équation (8a) pour donner :

$$\Omega = \rho_{mél} g q_{mél} S \quad (8c)$$

où

$$\rho_{mél} = \rho_e + (1 - \frac{\rho_e}{\rho_s}) C_s \quad (9)$$

$\rho_e = 10^3 \text{ kg/m}^3$ est la masse volumique de l'eau, $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique du solide et C_s celle du mélange eau/sédiments.

En remplaçant ρ_e et ρ_s par leurs valeurs, l'équation (9) devient :

$$\rho_{mél} = 1000 + 0.622 C_s \quad (10)$$

3- Equipement

3.1- Simulateur de pluie

Le simulateur de pluie du laboratoire est semblable à celui utilisé par plusieurs auteurs. Des précipitations artificielles, ayant les caractéristiques des pluies naturelles en Algérie, ont été reproduites en utilisant 4 buses d'aspersion de type H1/4VV. Ces buses sont animées d'un mouvement pendulaire variable de telle manière à couvrir la surface du sol. Le système d'aspersion est fixé à la tête d'un portique de 2,7 m de hauteur et plus de 3m de largeur. Ce système comprend un moteur muni d'un bras servant à assurer l'oscillation. La buse fixée sur ce bras est alimentée en eau par un tuyau, lequel est, à son tour, relié à une citerne à l'aide d'une pompe. Pour faire varier l'intensité de pluie, une vanne de contrôle est installée sur le tuyau de refoulement; un manomètre, placé avant la buse, permet d'indiquer la pression correspondant à chacune d'elle.

3.2- Le bac de sol

Le bac de sol utilisé dans cette étude est en plexiglas, a 2 m de longueur, 50 cm de largeur et 20 cm de hauteur. Un réservoir d'alimentation en eau est fixé à la partie supérieure du bac pour simuler des écoulements sans pluie. Un collecteur de débit liquide/solide est fixé à l'exutoire du bac avec un fond incliné afin d'éviter la décantation des particules solides. Le bac est également équipé d'un système d'ajustement de pente comprenant deux tiges filetées avec deux volants. La rotation de ces volants permet la variation de la pente. Dans le but de drainer les eaux infiltrées, des orifices sont percés sur la partie inférieure du bac.

Afin d'éviter le glissement du sol sur un fond lisse (plexiglas) et diminuer l'épaisseur de la couche du sol utilisée, une couche de 7 cm de gravier a été étalée sur le fond et couverte d'une bâche en plastique perforé. Ce système permet une bonne infiltration et évite le mélange sol/gravier.

4- Procédures expérimentales

4.1- Préparation du sol

Le sol utilisé dans cette étude est un sol sableux agricole (argile : 7,2%, limon : 6,4%, limon grossier : 5,2%, sable fin : 19% et sable grossier : 62%). Ce sol agricole est débarrassé

des pierres, racines et grosses mottes (tamis de 4 x 4 mm) dans le but d'avoir une structure homogène (rugosité homogène).

Pour réaliser l'expérience, une couche de 8 cm de sol nettoyé est répartie uniformément sur la surface; on fait ensuite coulisser légèrement une planche lisse pour niveler le sol à ras avec les parois du bac. Juste avant l'expérience, on humidifie le sol jusqu'à saturation à l'aide d'un arroseur en gardant l'état initial de la structure de la surface du sol. La pente choisie pour toutes les expériences est de l'ordre de 5% (sin 2.9°).

4.2-Mesure de l'intensité de pluie

La méthode employée, pour mesurer l'intensité de pluie, est la méthode volumétrique simple. L'intensité de pluie est fixée à l'aide de la vanne installée sur le tuyau de refoulement et par la vitesse d'oscillation du pendule. Une série de béciers, de même surface de réception (32 cm²), est répartie sur la surface horizontale du bac pour collecter les eaux de l'averse. La durée de l'averse dépend de l'intensité de pluie (volume collecté). Le volume recueilli est divisé par la surface de l'ouverture du bécier et par la durée de l'averse pour donner l'intensité de pluie. Cette manipulation est répétée cinq fois avec le calcul du coefficient d'uniformité pour avoir une intensité de pluie moyenne. Les intensités de pluie choisies dans cette étude sont : 17,5 cm/h ; 25 cm/h ; 35 cm/h ; 97 cm/h et 108 cm/h.

4.3-Mesure du débit et de la concentration des sédiments

La méthode utilisée pour mesurer le débit du mélange eau/sédiments est la méthode volumétrique. La durée de l'expérience est de 26 minutes pour les cinq intensités de pluie. Le sol utilisé étant saturé, cela revient à dire que le ruissellement commence avec l'arrivée de la pluie sur le sol et le premier prélèvement est alors effectué dans la première minute. Les autres prélèvements sont ensuite réalisés toutes les trois minutes. L'essai est répété cinq fois pour représenter la concentration moyenne des sédiments. Le mélange eau/sédiments est recueilli dans le collecteur à l'exutoire et les prélèvements du mélange effectués, pendant 30 secondes, dans des éprouvettes de 1000 ml. Le débit mesuré est alors donné par le rapport du volume au temps de collecte.

Chaque échantillon (éprouvette) utilisé est agité jusqu'à homogénéité et un volume de 100 ml du mélange est versé dans un bécier. Ceux-ci sont ensuite séchés à l'étuve pendant 24 heures et à 105° C ; la différence de poids donne ainsi la concentration des sédiments en kg/m³.

4.4-Mesure de la vitesse moyenne de ruissellement

La méthode employée pour mesurer la vitesse de ruissellement est la même que celle utilisée par plusieurs auteurs [8, 3, 12]. La méthode est basée sur le parcours du colorant entraîné par le ruissellement (dye tracing). Le bac est divisé en tronçons de longueur d = 50 cm où des repères de mesure sont fixés. Un colorant liquide de permanganate de Potassium (KMNO₄) est injecté à la tête de la parcelle de sol. En suivant le cheminement du mélange coloré, on enregistre le temps d'arrivée au niveau de chaque repère pour connaître la durée t du parcours. La vitesse v pour chaque tronçon est alors déterminée ($v = d/t$) et la moyenne des vitesses représente la vitesse d'un essai. L'essai est répété cinq fois pour chaque intensité. Un facteur de correction de 0,67 [12] est utilisé pour déterminer la vitesse moyenne de ruissellement pour chaque intensité de pluie.

4.5-Calcul des caractéristiques hydrauliques de ruissellement

4.5.1-Profondeur de ruissellement

La profondeur h de l'écoulement est calculée à partir de l'équation du débit unitaire :

$$q=U.h \quad (11)$$

U étant la vitesse moyenne de ruissellement.

4.5.2-Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est calculé à partir de la relation suivante :

$$Re=Uh/v \quad (12)$$

v représentant la viscosité cinématique.

4.5.3-Le nombre de Froude

Le nombre de Froude est déterminé par :

$$Fr=U/(gh)^{1/2} \quad (13)$$

où g est l'accélération due à la gravité.

5-Résultats et discussion

5.1-Régime de ruissellement

Le régime de ruissellement est gouverné par deux paramètres que sont le nombre de Froude et le nombre de Reynolds. Celui-ci, calculé pour les cinq intensités de pluie, varie entre 5,6 et 54. Il s'ensuit que numériquement le nombre de Reynolds varie avec l'intensité de pluie sans toutefois dépasser la phase laminaire. En suivant les expériences de près, on remarque que l'écoulement est perturbé. Cette perturbation est provoquée par l'impact des gouttes de pluie sur le sol remanié agricole. Ce genre de régime est appelé, par [3] "écoulement perturbé". Killinc et Richardson [9], en étudiant le mécanisme de l'érosion du sol en utilisant de la pluie artificielle, appellent ce type de régime "écoulement laminaire agité".

Les valeurs calculées du nombre de Froude sont 0,07 ; 0,1 ; 0,11 ; 0,16 et 0,168 correspondant respectivement aux intensités de pluie de 17,5 cm/h ; 25 cm/h ; 35 cm/h ; 97 cm/h et 108 cm/h. On note bien que la valeur du nombre de Froude est toujours celle d'un régime fluvial. Le régime d'un ruissellement généré par la pluie sur un sol agricole remanié est lié non seulement à la vitesse et à la profondeur, mais aussi aux caractéristiques de la surface du sol. La pente du terrain, qui augmente la vitesse et diminue la profondeur, peut agir sur le nombre de Froude. Cette pente peut aussi changer la rugosité de la surface du sol en créant des rigoles qui accélèrent la vitesse et augmentent alors le nombre de Froude. La concentration des sédiments agit sur la viscosité cinématique, donc sur le nombre de Reynolds. L'érodibilité du sol peut aussi contribuer à l'explication du régime de ruissellement.

5.2- Relation entre la concentration des sédiments et l'intensité de pluie

La relation, entre l'érosion du sol des inter-rigoles et l'intensité de pluie, est généralement exprimée empiriquement sous la forme suivante d'une fonction en puissance :

$$E=ai^b \quad (14)$$

E est le taux d'érosion des inter-rigoles pour une durée de pluie (t/ha.h), a et b sont des constantes liées aux propriétés du sol et I est l'intensité de pluie pour la même durée [13, 14, 23]. Les valeurs du coefficient b diffèrent d'un auteur à un autre, suivant les caractéristiques de la surface du sol (sol nu, sol couvert, ...).

Dans cette étude, le sol utilisé est un sol agricole remanié (sableux). Les résultats représentant les effets de l'intensité de pluie sur l'érosion sont illustrés sur la Fig. 1. Comme indiqué par cette figure, l'allure de la courbe montre que la concentration des sédiments évolue avec l'intensité de pluie en fonction puissance. La fonction puissance de régression, avec le coefficient de détermination, est représentée par l'équation (15) :

$$C_s = 2.10^{-4}I^{2.5} \quad R^2 = 0.92 \quad (15)$$

Le coefficient de détermination $R^2 = 0.92$ montre bien que l'érosion du sol est hautement liée à l'intensité de pluie en évoluant en fonction puissance. Le coefficient $b = 2,5$ de cette étude est différent de celui trouvé par Meyer [13]. Son coefficient $b = 2$ est le même pour les trois courbes représentant les différentes phases de développement d'une culture (début de culture, une partie couverte, totalement couverte). Le même auteur a étudié cette relation puissance avec trois types de sol : Memphis, Loring, Brooksville ; le coefficient b correspondant est de 2,04 ; 1,91 et 1,65 respectivement. Les résultats de [23], en utilisant quatre types de sol, ont montré que le coefficient b varie de 0,91 à 2,05.

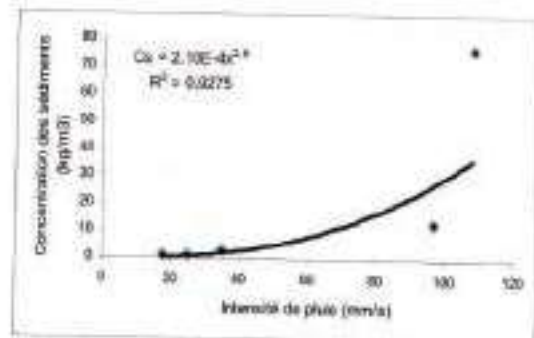


Figure 1 : Relation entre la concentration des sédiments et l'intensité de pluie

Le coefficient b de cette étude est un peu élevé par rapport à celui de Meyer [13] et celui de [23]. Cette différence peut être due à certaines conditions comme le couvert végétal utilisé par [13], l'état du prélèvement du sol (sec ou humide) utilisé par [23]. Il est à noter que, dans cette étude, l'érosion du sol a été quantifiée en kg/m^3 alors que celle des autres auteurs est en $\text{t}/\text{ha}/\text{h}$.

5.3- Relation entre la concentration des sédiments et la puissance érosive de pluie

Les résultats représentant les valeurs mesurées de la concentration des sédiments et les valeurs de la puissance érosive de pluie estimée par les équations (1 et 2) sont illustrés sur la Fig. 2. Les analyses statistiques de cette relation ont donné une équation de régression et un coefficient de détermination comme suit :

$$C_s = 2578,5P_i^{2,25} \quad R^2 = 0,92 \quad (16)$$

La courbe représentative de cette relation montre bien l'évolution de la concentration des sédiments avec la puissance érosive de pluie. Cette évolution suit une fonction puissance avec un coefficient de détermination de $R^2 = 0,92$.

On remarque bien que l'allure de la courbe représentant la concentration des sédiments avec l'intensité de pluie est similaire à celle représentant la concentration des sédiments avec la puissance érosive de pluie. Cela revient à dire que l'érosion hydrique du sol réagit de la même manière avec l'intensité de pluie et la puissance érosive de pluie. Dans l'équation (2), l'intensité de pluie contribue au même degré que la pente du terrain à l'évaluation de la puissance érosive, mais la vitesse de l'impact des gouttes de pluie a un effet double sur la puissance érosive. Cela mène à choisir la puissance érosive de pluie comme facteur dominant pour représenter l'érosivité de pluie.

Dans ce sens, [21] ont étudié l'estimation de la capacité de l'érosion par ruissellement en utilisant la puissance unitaire de l'écoulement. Les auteurs ont utilisé l'intensité de pluie, la vitesse d'impact de la pluie, la puissance de la pluie, le rapport intensité de pluie/vitesse d'écoulement et le rapport intensité de pluie/profondeur de l'écoulement pour déterminer l'importance des facteurs associés à

l'impact de pluie. Leurs résultats ont montré que le rapport intensité de pluie/vitesse d'écoulement a le plus haut coefficient de corrélation (-0,43) avec l'impact de pluie sur la concentration des sédiments.

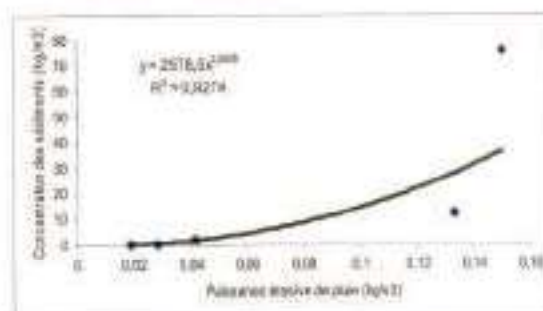


Figure 2 : Relation entre la concentration des sédiments et la puissance érosive de pluie

5.4-Relation entre la concentration des sédiments et la puissance de ruissellement

Les résultats, représentant la relation entre la puissance de ruissellement et la concentration des sédiments, sont illustrés sur la Fig. 3. Les différents modèles statistiques tels que le linéaire, le polynomial, le logarithmique, l'exponentiel et la loi en puissance sont testés et l'équation de régression de la fonction exponentielle a été choisie avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,97$.

$$C_s = 0,21e^{197,061} \quad R^2 = 0,97 \quad (17)$$

Nearing et al. [19] ont étudié l'hydraulique et l'érosion des rigoles érodées sur différents types de sol (6 types). Ils ont testé plusieurs fonctions statistiques, pour aboutir à la fonction logarithmique entre le débit solide q_s et la puissance ω de l'écoulement, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,93$.

Les résultats de cette étude ont montré que la concentration des sédiments croît rapidement avec la puissance de ruissellement. Cette croissance est due aux effets de la tension de frottement qui dépend de la profondeur et de la pente. En plus, il y a la participation des particules arrachées par le phénomène de rejaillissement, causées par l'impact des gouttes de pluie. L'explication suivante pourrait être formulée : plus l'intensité de pluie augmente, plus le diamètre de la goutte de pluie augmente et atteint facilement le sol en arrachant les particules.

Vu l'importance de la puissance de ruissellement sur l'érosion du sol, ce paramètre a été testé sur les inter-rigoles, sur les rigoles et pour différents types de sol. Everaert [4] a mené des expériences pour mesurer la capacité de transport des inter-rigoles. Il a montré que la puissance effective de l'écoulement donne les meilleures corrélations pour toutes les dimensions des grains de sédiments. Pour McIsaac et al. [16], la puissance unitaire de l'écoulement est hautement corrélée avec le taux de détachement. Moore et Burch [17] ont trouvé que la théorie de la puissance de l'écoulement est simple en restant une méthode robuste pour estimer la capacité de transport, que ce soit pour les inter-rigoles ou pour les rigoles.

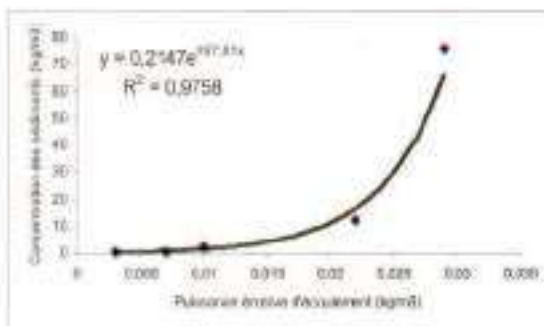


Figure 3 : Relation entre la puissance de ruissellement et la concentration des sédiments

De ces résultats, on peut conclure que l'érosion du sol croît rapidement avec la puissance de ruissellement. Théoriquement, cette puissance dépend de la pente, du débit qui, lui-même, dépend de l'intensité de pluie. La nature du sol, représentée par l'érodibilité, joue également un rôle dans la quantification de l'érosion.

6- Conclusion

La conclusion peut être résumée comme suit:

- Le régime de ruissellement généré par la pluie est laminaire et fluvial. La présence des gouttes de pluie perturbe l'écoulement et le régime est laminaire agité.
- La relation entre la concentration des sédiments et l'intensité de pluie suit une loi en puissance avec un coefficient de détermination élevé. Le coefficient 'b' de cette fonction représente les différentes caractéristiques du sol, à savoir la texture, la structure, la pente,

l'humidité, la couverture, etc.

La puissance érosive de pluie, qui est fonction de l'intensité de pluie, de la vitesse terminale de chute et de la pente du terrain, évolue avec la concentration des sédiments de la même manière que l'intensité de pluie seule. Comme la puissance érosive comprend toutes les caractéristiques de la pluie, elle est considérée comme un facteur dominant et érosif

La puissance érosive de ruissellement est reliée à l'érosion des inter-rigoles. La relation de ce paramètre avec la concentration des sédiments suit une fonction exponentielle avec un coefficient de détermination important. Théoriquement, cette puissance est fonction de la pente, du débit et de la densité du mélange eau/sédiments. Cette densité est fonction de la concentration des sédiments qui est elle-même fonction du type de sol.

Références bibliographiques

- [1] Ciampalini R. et D. Torri, Detachment of soil particles by shallow flow: Sampling methodology and observations. *Catena*, 32, pp: 37-53, 1998.
- [2] Elliot, W.J. and J.M. Lafien, A process-based erosion model. *Amer. Socie. of Agric. Engineers*, 36, pp: 65-72, 1993.
- [3] Emmett, W.W., The hydraulics of overland flow on hillslopes, *Geological survey professional Paper 662-A.*, 1970.
- [4] Everaert W., Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow. *Earth Surf. Proc. and Landforms*. Vol. 16 pp: 513-532, 1991.
- [5] Farenhorst A. et R.B. Bryan, Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. *Catena* 25, pp: 47-62, 1995.
- [6] Foster G.R. , L.D. Meyer et C.A. Onstad, An equation derived from basic erosion principles. *Transactions of the ASAE* pp: 678-682, 1977.
- [7] Gabet E. J. et D. Dunne, Sediment detachment by rain power. *Water Res. Research*. Vol.39, No: 1 pp: 1002, 2003.

- [8] Guy B.T. W.T. Dickinson et R.P. Rudra, Hydraulics of sediment laden sheetflow and the influence of simulated rainfall. *Earth Surf. Processes and Landforms* 15, pp: 10-18.,1990.
- [9] Killinc, M. and Richardson, E.V., Mechanics of soil erosion from overland flow generated by simulated rainfall. Colo. State Univ., Hydrologi c paper, Number 63, FT. Collins, Colorado.,1973.
- [10] Knapen, A., J. Poesen, G. Govers, G. Gyssels, et J. Nachtergaele, Resistance of soils to concentrated flow erosion: Areview. *Earth Science Reviews* 80, pp:75-09, 2007.
- [11] Laws, J.O. et D.A. Parsons, The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Geophysical Union*, 24, pp: 452-460,1943.
- [12] Li, G., Preliminary study of the interference of surf ace objects and rainfall in overland flow resistance. *Catena* 78, pp: 154-158, 2009.
- [13] Meyer, L.D., How rain intensity affects interrill erosion, *Transactions of the ASAE*, pp1472-1475, 1981.
- [14] Meyer L.D. and W.C.Harmon, how row sideslope length and steepness affect side slope erosion. *Transactions of the ASAE* 32 pp: 639-644, 1989.
- [15] Mosley M.P., Rainsplash and the convexity of badland divides. *Zeits fur Geomorphologie Supplement*, 18, pp:10-25, 1974.
- [16] McIsaac G.F. J.K. Mitchell, J.W. Hummel W.J. Elliot, An evaluation of unit stream power theory for estimating soil detachment and sediment discharge from tilled soils. *Transaction of the ASAE* vol. 35, (2) pp: 535-544, 1992.
- [17] Moore, I.D. et G.J. Burch, Sediment transport capacité of seet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Res. Research*, Vol.22, No:8 pp: 350-1360, 1986.
- [18] Nearing M.A. J.M. Bradford et S.C. Parker, Soil detachment by shallow flow at low slope, *Soil Sci. Soc. Am. Jour.* 55, pp: 339-344, 1991.
- [19] Nearing M.A., D. Norton, D.A. Bulkakov, G.A. Larionov L.T. West, and K.M. Dontsova, Hydraulics and erosion in eroding rills *Water Resources Research*, vol. 33, N°4 pp: 865-876, 1997.
- [20] Rose C.W. , J.R. Williams, G.C.Sander et D.A. Barry, A mathematical model of soil erosion and deposition process: II. Application to data from an arid zone catchment. *Soil Sci. Soc. Am. Jour.* 47, pp: 996-1000, 1983.
- [21] Shih H.M. et C.T. Yang, Estimating overland flow erosion capacity using unit stream power. *International Jour. of Sediment Research.* 24 pp: 46-52, 2009.
- [22] Schmidt J. Modeling log-term soil loss and landform change in overland flow. *Hydraulics and erosion mechanics*, edited by A.J. Parsons, 1993.
- [23] Truman, C.C. and J.M. Bradford. Relationships between rainfall intensity and the interrill soil loss-slope steepness ratio as affected by antecedent water content. *Soil Science*, 156, pp: 405-413, 1993.