

Mesure et interprétation du processus d'érosion dans les marnes des Alpes du Sud à l'échelle de la petite ravine

N. Mathys, M. Meunier, C. Guet

C.E.M.A.G.R.E.F., Grenoble

1. Présentation du bassin, des mesures, et de la méthodologie d'analyse

1.1. Présentation du bassin

Les bassins versants expérimentaux de Draix, à 15 km au Nord-Est de Digne dans les Alpes-de-Haute-Provence, ont été installés et observés à partir de 1983. Ils sont situés sur les terrains marneux du Callovo-Oxfordien, généralement appelés « marnes noires ».

Le plus petit des bassins observés, la Roubine, d'une superficie d'environ 1/8 d'hectare, peut être considéré comme l'unité hydrographique de base sur laquelle on peut mesurer le résultat des processus érosifs.

La Roubine est donc un bassin élémentaire de 1 330 m² en surface horizontale dont seulement 20 % sont végétalisés ; la pente des versants est de l'ordre de 70 %.

1.2. Les mesures

La pluie est mesurée à partir d'un pluviographe très proche du bassin. Les débits et les transports solides sont mesurés dans un ensemble comprenant une fosse de dépôt à l'amont d'une grille permettant de stocker l'essentiel des transports solides, puis un déversoir triangulaire à mince paroi équipé d'un limnigraphe et

d'un préleveur d'échantillon permettant une mesure discontinue de la concentration. Compte tenu des conditions d'écoulement au voisinage de la crépine du préleveur, on admet que la mesure ponctuelle de la concentration fournie par le préleveur donne une valeur de la concentration moyenne dans la section.

Le déclenchement du préleveur sur ordre d'un programme asservi à la cote enregistrée par le limnigraphe permet de connaître l'évolution de la concentration au cours de la crue.

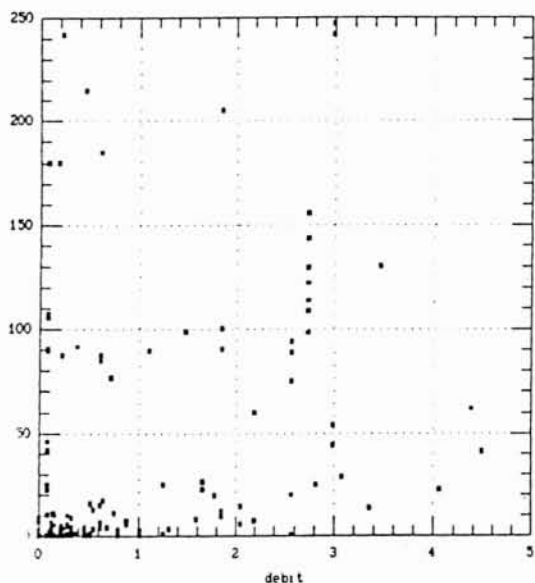
On constate qu'il n'y a pas de liaison biunivoque entre le débit et la concentration, toutes crues confondues (*fig. 1*), mais on peut observer un certain déterminisme au cours d'une seule crue à plusieurs pointes (*fig. 2*). Cette constatation nous permet de calculer le débit solide transporté, en complétant, si besoin est, les courbes d'hystérésis dont on connaît, à partir de l'hydrogramme, les bornes verticales. Mais on en déduit aussi qu'une mesure de la concentration, ponctuelle dans le temps, a peu de chance de représenter la concentration moyenne de la crue.

Les relevés des volumes de sédiments dans la plage de dépôt se font toutes les semaines, ce qui restreint et parfois interdit l'interprétation des résultats quand il y a deux ou plusieurs crues dans la semaine. Les mesures de densité, effectuées de façon non systématique, nous conduisent à retenir une valeur de 1,7 pour les dépôts dans la plage.

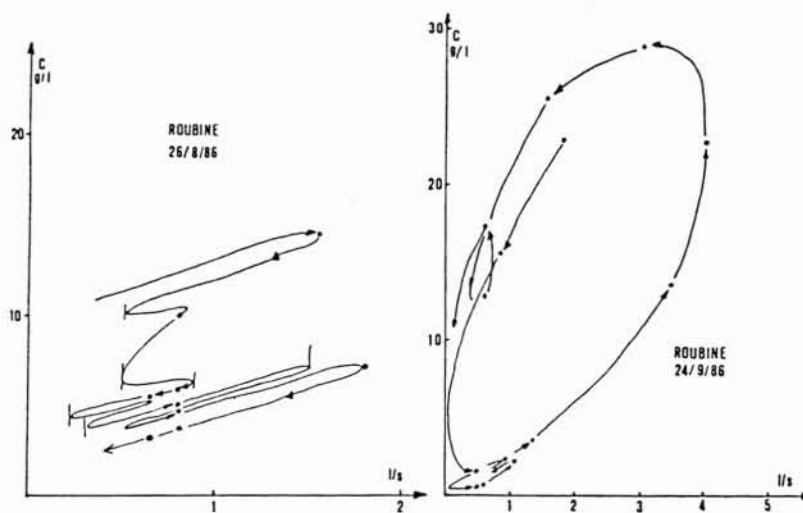
Measurement and interpretation of the erosion process in South Alps marls, at the scale of a little gully

In the experimental catchments of Draix (Alpes-de-Haute-Provence), the erosion of black marls of South Alps are studied.

When the measurement devices of the smallest basin (1 330 m²) has been presented, the quality of the data is examined in order to select those which are usable. After a qualitative analysis of erosion process, the results of erosion measurements are explained by : detection of thresholds of run-off and erosion (taking care of previous situation) ; multiple regression with rainfall intensity, kinetic energy of rainfall (Wishmeyer, etc...), discharge, etc... at the scale of an event and at the scale of the season.



1. Relation concentration/débit, toutes crues confondues.



2. Relation concentration/débit au cours d'une crue.

1.3. Description qualitative des processus érosifs

La source essentielle des sédiments provient de la détérioration des marnes à l'air sous l'effet combiné des alternances gel/dégel et humidité/sécheresse. Plaquettes et paillettes de la couche altérée déstructurée par les fortes intensités de pluie, sont érodées par la pluie et le vent ou glissent les unes sur les autres, s'amassent dans les talwegs pour être emportées à la première crue. Dans l'écoulement ces parcelles solides sont assez vite cassées et détruites de sorte que la taille des particules transportées diminue rapidement en fonction de la distance parcourue : 90 % du transport solide de la Roubine (1/8 d'ha) et seulement 25 à 30 % de celui du Laval (86 ha) se déposent dans les fosses à sédiments.

On observe également des coulées le long des versants, parfois prolongées en laves torrentielles sur les grands bassins. Sur la Roubine, elles se traduisent par un apport très important de sédiments dans le piège malgré un écoulement très faible.

1.4. Méthode d'analyse

Deux problèmes se posent pour la constitution de l'échantillon de l'étude :

- les processus érosifs peuvent être différents d'une crue à l'autre ;
- à cause de l'absence de prélèvements au cours de certaines crues, on dispose de plus de mesures des volumes déposés que de mesures des volumes transités. Comme on ne peut pas faire de partition a priori des événements en fonction de la nature du processus érosif, on s'est contenté d'éliminer les épisodes souvent complexes d'hiver et de début de printemps (neige ou pluie, sol gelé, solifluxion, coulées boueuses... et fon-

ctionnement difficile des appareils) pour retenir une saison unique allant en moyenne de début avril à fin octobre ou novembre. L'analyse des volumes transités au cours des crues où dépôt et transit ont été mesurés peut permettre de compléter les données manquantes de MES pour les autres crues.

Par ailleurs, comme certaines mesures de volumes déposés correspondent, du fait de la périodicité des relevés, à plusieurs crues successives, on doit procéder en deux phases :

- sur les épisodes pluvieux complètement mesurés (pluie, débit liquide, débit solide transité, volume déposé), on détermine les variables explicatives les plus pertinentes et la « formule » d'explication la plus fiable ;
- pour les séries d'épisodes dont on connaît le dépôt global, la « formule » obtenue permet de proposer une répartition du volume total entre les différents épisodes de la série. L'analyse de l'échantillon étendu conduit à une nouvelle « formule » explicative et on recommence l'estimation de la répartition des volumes dont on ne connaît que le cumul, jusqu'à la convergence.

2. Analyse des résultats

2.1. Description de l'échantillon et de ses paramètres descriptifs

La période exploitée comprend les années 1984 à 1987, au cours desquelles tous les épisodes pluvieux ayant donné un ruissellement, même faible, ont été relevés. L'examen attentif de cette série (92 événements) a permis de sélectionner les événements de la saison non hivernale définie plus haut, soit 59 crues.

Un certain nombre de paramètres pluviométriques, débitométriques et caractérisant les transports solides, ont été choisis a priori :

h_{tot}	= hauteur totale de pluie de l'épisode, en mm,
$i_5, i_{10}, i_{15}, i_{30}$	= intensité maximale de la pluie en 5, 10, 15 ou 30 mm, exprimée en mm/h,
q_{max}	= débit de pointe de la crue en l/s,
v_{dev}	= volume total de la crue, en l,
v_{mes}	= volume solide transité, en l,
v_{dep}	= volume solide déposé, en l,
e_{jm^2}	= énergie cinétique totale de l'épisode pluvieux en joules/m ² .

Ce dernier paramètre, inspiré des travaux classiques de WISHMEYER, s'exprime (en joules/m²) pour un épisode composé de n séquences d'intensité i , par l'équation :

$$e_{jm^2} = \sum_1^n (11,9 + 8,73 \log_{10} i) * dh$$

où i est l'intensité (en mm/h) et dh la hauteur de pluie (en mm) de la séquence.

2.2. Complémentation des données de MES

Compte tenu de la superficie très faible du bassin versant de la Roubine, on peut admettre qu'au cours d'une crue la totalité du bassin contribue à l'écoulement ; la concentration moyenne doit donc dépendre essentiellement des caractéristiques de la crue : par exemple, pour les crues complexes, la concentration instantanée est reliée par des cycles au débit et elle décroît de cycle en cycle (fig. 2) ; on en déduit que la concentration moyenne doit être corrélée négativement au volume écoulé. On peut penser également que la concentration en MES dépend de la destruction des plaquettes et paillettes de marnes en éléments fins ; que cette désagrégation dépend de la turbulence, elle-même représentée par l'importance de l'écoulement donc soit le débit maximum, soit l'intensité de la pluie.

L'examen des coefficients de corrélation entre les différents paramètres nous permet d'observer que :

- la concentration moyenne (mess_{dev}) est bien corrélée négativement au volume liquide ($-0,22$) et positivement à l'intensité en 15 mm ($0,71$), au débit maximum ($0,58$) et au volume déposé ($0,86$) ;
- le volume de MES (v_{mes}) est peu corrélé au volume déposé ($0,60$) mais très bien corrélé au débit maximum ($0,94$) ou à l'intensité en 15 mm ($0,84$) ; ces deux variables étant assez bien corrélées entre elles ($0,76$), une seule suffira dans les régressions.

Comme nous avons utilisé plusieurs méthodes de régression et que la signification des coefficients de détermination n'est pas la même dans tous les cas, on précisera en regard des formules trouvées la méthode utilisée : régression linéaire sur les valeurs naturelles (RLN), sur les logarithmes (RLL), régression curviligne (RC) que nous privilégierons, notre but étant plutôt d'estimer les grandes valeurs.

Les formules obtenues sont les suivantes :

— pour la concentration moyenne, mess_{dev} :

$$\text{mess}_{\text{dev}} = 0,015 q_{\text{max}}^{1,156} \quad (\text{RLL})$$

$$R = 0,74 \quad (1)$$

$$\text{mess}_{\text{dev}} = 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot i_{15}^{2,17} v_{\text{dev}}^{-0,24} \quad (\text{RLL})$$

$$R = 0,82 \quad (2)$$

$$\text{mess}_{\text{dev}} = 5,49 q_{\text{max}}^{1,07} v_{\text{dev}}^{-0,86} \quad (\text{RC})$$

$$R = 0,88 \quad (3)$$

— pour le volume de MES, v_{mes} :

$$v_{\text{mes}} = 28 (q_{\text{max}} - 0,61) \quad (\text{RLN})$$

$$R = 0,94 \quad (4)$$

$$v_{\text{mes}} = 15,77 q_{\text{max}}^{1,189} \quad (\text{RC})$$

$$R = 0,95 \quad (5)$$

$$v_{\text{mes}} = 3,96 q_{\text{max}}^{1,04} v_{\text{dev}}^{0,19} \quad (\text{RC})$$

$$R = 0,95 \quad (6)$$

On constate que le passage de 1 à 2 variables explicatives améliore la régression pour la concentration moyenne mais quasiment pas pour les MES : on voit que la régression linéaire sur les valeurs naturelles (formule (4)), de v_{mes} pourrait servir à l'introduction d'un seuil de crue à partir duquel l'érosion se produirait ; en fait, ce seuil est assez artificiel et l'examen des valeurs naturelles (cf. fig. 3) montre qu'en dessous de ce seuil on trouve des crues avec débit solide. On peut donc admettre que le seuil de l'érosion se confond avec le seuil du ruissellement.

Si on compare les formules (3), (5) et (6), on voit que l'exposant de q_{max} est stable, et que les exposants de v_{dev} dans les formules (3) et (6) sont parfaitement cohérents entre eux. Comme de plus, l'échantillon n'est pas très fourni (24 valeurs), nous utilisons la formule (5) représentée sur la figure 3 pour compléter les valeurs de v_{mes} .

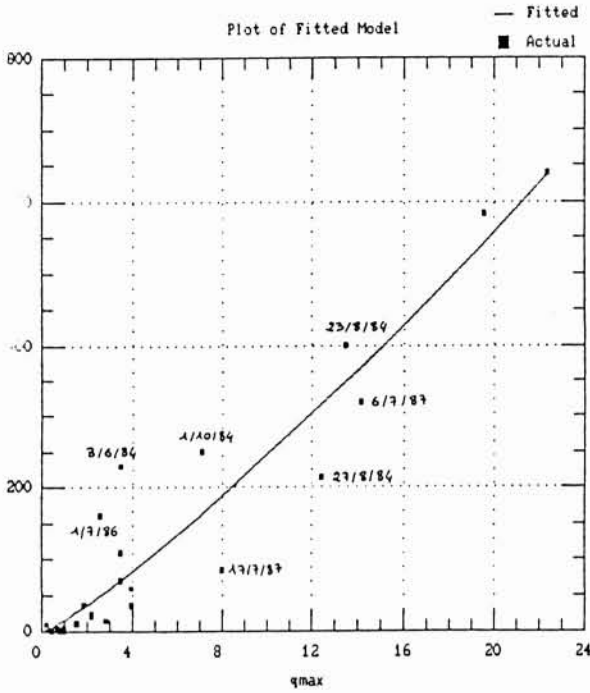
2.3. Etude de l'érosion totale au niveau de l'épisode pluvieux

On peut maintenant calculer le poids total du matériau solide totpoi : nous adopterons la densité 1,7 pour les dépôts dans le piège et 2,75 pour les MES.

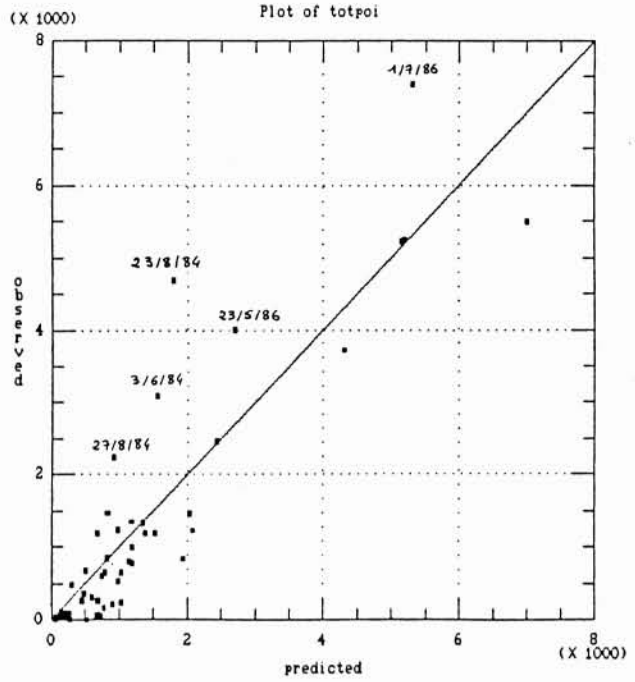
2.3.1. Obtention de la formule explicative

Sur l'échantillon limité des 26 épisodes dont on connaît toutes les variables, l'analyse des coefficients de corrélation montre que :

- l'érosion (totpoi) est peu expliquée par le volume déversé ($0,42$) et de façon intéressante et à peu près semblable (R compris entre $0,68$ et $0,82$) par le débit maximum, l'énergie cinétique, et l'intensité de la pluie ;
- les intensités en 5, 10, 15 et 30 min sont bien corrélées entre elles et expliquent souvent de façon à peu



3. Régression non linéaire $v_{mes} = 15,77 q_{max}^{1,189}$.



4. Erosion totale (totpoi). Valeurs observées et valeurs calculées par la formule (7).

près identique aussi bien le débit maximum, le volume de dépôts ou le volume de MES. On pourrait donc se servir a priori de n'importe quelle variable ; i_{15} explique moins bien q_{max} et comme i_{30} est mieux corrélé que i_{15} avec l'énergie cinétique, c'est souvent i_{15} qui est retenu dans les régressions multiples du type « pas à pas ».

En conclusion, on va tenter de corrélérer le mieux possible l'érosion (totpoi) aux variables explicatives : q_{max} , e_{jm}^2 et i_{15} .

Ainsi qu'indiqué ci-dessus, on a procédé par itérations de manière à répartir au mieux les volumes déposés connus globalement. La convergence est obtenue au bout de 5 itérations et donne :

$$\text{Erosion (kg/ha)} = 1,84 i_{15}^{0,86} e_{jm}^{0,97} \quad (\text{RC}) \quad R = 0,9 \quad (7)$$

la quantité d'érosion étant entendue ici comme le poids de terre enlevé au cours d'un épisode pluvieux non hivernal.

2.3.2. Analyse de la régression

La régression n'est pas excellente, ce que montre le graphique n° 4. Cinq crues sortent manifestement de la régression ; trois d'entre elles se situent en 1984, année où le poste pluviométrique utilisé était différent et plus éloigné de la Roubine. Les deux autres sont des écoulements hyperconcentrés.

On pourrait être tenté d'écarter de la régression les crues caractérisées par une forte valeur du rapport poids

de matériau/volume déversé. Mais les deux crues ci-dessus ne sont pas les seules : si on divise l'échantillon initial en deux populations selon ce critère, dix événements ont une valeur de ce rapport supérieure à 0,5 kg/l (on pourrait les appeler « laves torrentielles »).

L'analyse de l'échantillon restant aboutit à une nouvelle régression :

$$\text{Erosion (kg/ha)} = 0,28 i_{15}^{0,78} e_{jm}^{1,25} \quad (\text{RC}) \quad R = 0,92 \quad (8)$$

Sur cet échantillon, q_{max} explique mieux l'érosion :

$$\text{Erosion (kg/ha)} = 32 e_{jm}^{0,78} q_{max}^{0,65} \quad (\text{RC}) \quad R = 0,95 \quad (9)$$

L'analyse des crues fortement chargées n'est pas possible compte tenu de la taille de l'échantillon (10 valeurs). Elle devrait être reprise lorsque la série des observations sera plus longue mais il serait nécessaire de trouver un critère plus pertinent pour séparer les épisodes classés « laves torrentielles ».

2.3.3. Autres formules explicatives

Les exposants de la formule trouvée étant très proches de l'unité, il est intéressant de regarder la qualité de la régression avec une formule du type de celle de WISHMEYER : le coefficient de corrélation ($R = 0,89$) est très peu inférieur et on obtient, rapportée à l'unité de surface dégradée :

$$\text{Erosion (kg/ha)} = 0,8 \cdot i_{15} \cdot e_{jm}^2 \quad (10)$$

La durée de l'épisode sec précédant la pluie (t_s) joue un rôle, l'altération des marnes se poursuivant et augmentant la quantité de matériaux disponible, rôle que l'on peut mettre en évidence par la formule suivante qui améliore le coefficient de détermination :

$$\text{— Erosion (kg/ha)} = 1,84 e_{jm}^{0,87} i_{15}^{0,93} t_s^{0,15} \text{ (RC)} \\ R = 0,92 . \quad (11)$$

2.4. Etude de l'érosion globale

2.4.1. Période non hivernale

Au cours de la période non hivernale, on peut comparer sur la série d'événements pluvieux analysés, la somme des valeurs estimées par la formule (7) et les valeurs mesurées (dépôt dans la plage + MES). On observe sur les quatre saisons étudiées les écarts variant de 2 à 25 %.

2.4.2. Année complète

Les processus érosifs étant différents au cours de la saison hivernale, nous avons exclu les événements de cette période dans l'analyse ci-dessus. Afin de faire un bilan à l'échelle annuelle nous avons toutefois regardé ce que donnerait l'utilisation des formules trouvées pour l'estimation de l'érosion au cours de l'hiver : la méthode proposée ne permet pas d'estimer l'érosion de manière très satisfaisante (rapport estimation/mesure variant de 1 à 1,7). De plus, au cours de cette étude, nous n'avons

retenu que les épisodes pluvieux ayant effectivement donné lieu à un ruissellement. Or, pour effectuer des simulations, il faut pouvoir sélectionner les épisodes pluvieux produisant un écoulement. A Draix, le critère de sélection obtenu (Réf. (2)) permet de définir un seuil de ruissellement appelé pluie limite, fonction de la durée de l'épisode sec précédant la pluie t_s .

$$P \text{ limite} = 12 - 7 e^{-0,25 t_s} . \quad (12)$$

L'application de la formule (7) à toutes les pluies supérieures au seuil ainsi défini au cours de la période 1984-1987 donne les résultats suivants :

Années	1984	1985	1986	1987
Valeurs mesurées	11,0	7,0	15,8	11,6
Valeurs estimées	10,1	9,2	15,1	15,3
$\frac{V_{est.} - V_{mes.}}{V_{mes.}}$	- 8,2 %	+ 31,4 %	- 4,4 %	+ 31,9 %

3. Conclusion

A ce stade de l'analyse, on peut proposer, à l'échelle d'un épisode pluvieux non hivernal, l'estimation de l'érosion à l'aide des formules (7) ou (11). A l'échelle annuelle, l'application de cette même formule à tous les épisodes supérieurs au seuil résultant de la formule (12) permettrait de simuler l'érosion avec une incertitude de l'ordre de 30 %.

Références bibliographiques

- [1] *Les Bassins Versants Expérimentaux de Draix*. Note de présentation et de synthèse. 2^e version. Mai 198 . CEMAGREF, ONF, RTM.
- [2] *Premier compte-rendu de recherches en érosion et hydraulique torrentielle. Les Bassins Versants Expérimentaux de Draix*. 1986.
- [3] *Etude de l'érosion pluviale dans le bassin de Draix*. Equation de Wislizenus. Outmoulat, El Haij. Mémoire de fin d'études, INPG, CEMAGREF.