

Bassins versants ravinés : analyse et prévisions selon le modèle E_s

t Jan DE PLOEY

Résumé

L'article explique les principes de base du modèle E_s de la susceptibilité à l'érosion de versants et de bassins versants. Ensuite est discutée son application aux ravines et aux systèmes de ravines (badlands). Le modèle insiste sur la réalité des combinaisons de processus et des effets compensateurs qui interviennent dans l'érosion de bassins versants. Le modèle conduit aux prévisions de la vitesse de développement de ravines et de l'âge de badlands. Ce dernier a été souvent sous-estimé, notamment en zone méditerranéenne.

Abstract

The paper explains the basic principles of the E_s model which concerns the erosional susceptibility of slopes and catchments. There is a specific discussion of its application to gullying and badlands. The model emphasizes the impact of process combinations and of compensatory effects which govern erosion in catchments. The model predicts gully development rates and the age of badlands which seems rather to be underestimated in several cases.

I. INTRODUCTION

Depuis longtemps — et d'ailleurs à juste titre — la géomorphologie établit une distinction systématique entre les effets de l'érosion linéaire et ceux de l'érosion en nappe. A la formation d'une ravine de talweg, par exemple, accompagnée d'une faible érosion de versants, correspond une augmentation de l'énergie du relief dans le bassin versant concerné, alors qu'une dénudation en nappe, surtout lorsque celle-ci s'accompagne d'un dépôt corrélatif de colluvions-alluvions, peut entraîner une réduction du relief (Fig. 1). Cette notion géomorphologique simple a des conséquences importantes concernant l'évaluation des effets de l'érosion des sols et l'appréciation de mesures de conservation des terres. Le processus du ravinement de talweg ne cause, en effet, qu'une érosion des sols très limitée, même si les volumes évacués sont importants.

Le second processus, celui au cours duquel le décapage des sols est total, impose, par contre, des mesures conservatrices urgentes. Bien souvent, l'évaluation classique des pertes en terre, exprimée par exemple en tonnes/km²/an ne représente pas, à elle seule, la distinction importante à faire entre les deux processus. A chiffre égal, il y a en effet de bonnes raisons pour qualifier l'érosion du bassin versant de type érosion en nappe de bien supérieure à celle qui entaille par une grande ravine centrale. En réalité, ce dernier phénomène n'exprime que l'effet universellement connu de l'action des eaux dans

des sections de talweg où le rapport pouvoir érosif/érodibilité atteint son maximum, surtout lorsque la charge solide issue de l'érosion des versants est minimale. Récemment, on a discuté, sur base quantitative, ces seuils qui gouvernent l'entaille de ravines dans les régions loessiques (DE PLOEY, 1990). Le modèle E_s tient compte de ces considérations. Son expression permet de différencier des systèmes d'érosion à pertes en terre égales.

Mais le modèle vise également à informer d'une autre réalité, celle de l'unité fonctionnelle des combinaisons de processus d'érosion, à l'encontre d'une certaine tendance qui voit trop l'érosion comme étant la résultante d'effets additifs de plusieurs processus élémentaires, considérés comme autant de facteurs distincts. Rien que le fait de classer la formation de rigoles et de ravines sous le chapitre "érosion par le ruissellement" peut nous faire oublier le rôle important des mouvements de masse dans le façonnement de ces unités. Des calculs récents encore inédits montrent qu'un pourcentage de 40 à 50 % de l'érosion primaire dans nos collines loessiques est dû à l'élargissement de ces systèmes linéaires provoqués par des mouvements de masse. Il est donc indiqué de rechercher une définition de la susceptibilité à l'érosion de bassins versants en fonction de cette réalité de combinaisons de processus (DE PLOEY, 1990). Le modèle E_s essaie de résoudre ce problème en faisant appel à une expression globale de l'énergie totale qui agit sur les systèmes d'érosion.

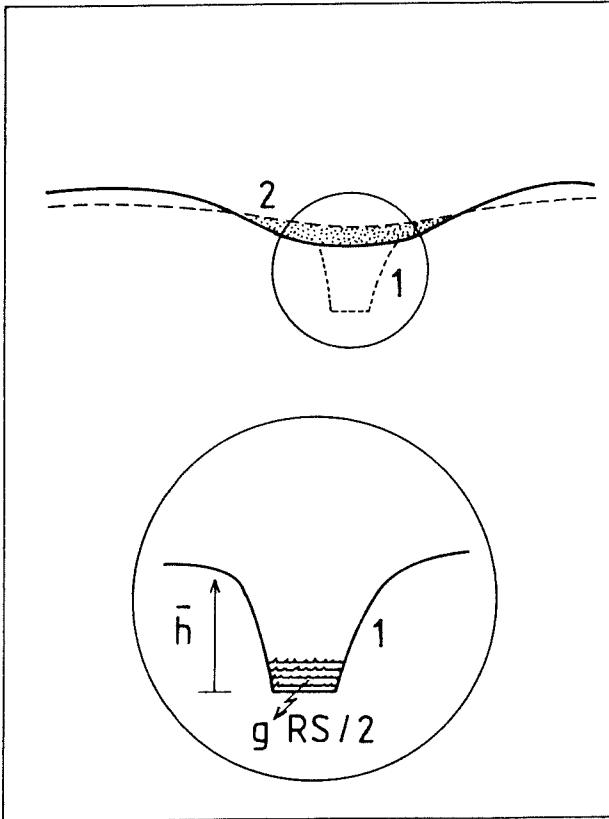


Figure 1 : Réduction de l'énergie du relief sous l'effet du colluvionnement d'une ravine.

II. LE MODÈLE E_S : EXPRESSION GÉNÉRALE ET APPLICATIONS AU RAVINEMENT.

L'érosion évacue en une période (t) un volume total (V_T) dans un bassin versant ou sur un versant d'une superficie (A). Le détachement et le transport de particules par les eaux courantes sont directement proportionnels à la vitesse de cisaillement u_o et à la pression de cisaillement

$$s = d_w u_o^2 = d_w g R S$$

(d_w = densité de l'eau; g = coefficient de gravité; R = rayon hydraulique moyen du courant; S = gradient de pente). Une incision hydraulique crée une dénivellation moyenne \bar{h} qui, à son tour, peut générer des mouvements en masse, par exemple, des glissements sur les parois de rigoles ou de ravines. Le facteur \bar{h} résulte donc d'une entaille dont l'origine relève de l'énergie cinétique des eaux courantes; \bar{h} correspond à une perte d'énergie potentielle (Fig. 1). Les deux facteurs, respectivement l'énergie potentielle et l'énergie cinétique, rentrent dans le dénominateur de l'expression générale de E_S (DE PLOEY, 1990, expression 16) :

$$E_S = \frac{V_T}{M g (\bar{h} + RS/2)} \quad (1)$$

M correspond à la masse totale des eaux pluviales précipitées sur A pendant une période considérée t . Aussi

$$M = AP = A p_t t$$

(P = total des précipitations/unité de surface; p_t = total des précipitations/unité de surface/unité de temps). L'introduction de M part de l'idée que l'érodibilité des terres au sein de A et de V_T dépend, à court et à long terme, directement et indirectement de la masse totale des eaux précipitées sur le bassin versant. M constitue le facteur hydrologique primaire qui gouverne fondamentalement les phénomènes d'érosion liés aux deux facteurs énergétiques $g\bar{h}$ et $gRS/2$. Dans le cas des mouvements en masse, M intervient dans le rapport pressions de cisaillement/résistances au cisaillement. Le choix de M , dans sa totalité, peut se justifier par de multiples arguments qui débordent du cadre de cet article.

Lorsqu'elle s'exprime en unités-standard - kg, m, s - l'expression (1) se réduit au rapport $s^2/m^2 = kg/kg m^2/s^2$, ce qui veut dire que E_S nous informe sur le rapport masse de terre érodée/énergie totale engagée, en joules.

Il est à noter que l'expression de E_S fait appel à des paramètres fondamentaux mais, en principe, faciles à déterminer, surtout lorsqu'on peut se passer de la détermination du facteur R .

Adaptée au cas de ravinements, E_S devient :

$$E_{S-G} = \frac{V_G}{M g (\bar{h} + RS/2)} \quad \text{et} \quad M = A p_t t \quad (2)$$

où V_G correspond au volume total de terre évacué pendant la période t d'une ravine ou de tout un système de ravines.

Puisque généralement $RS/2 \ll \bar{h}$ (le gradient de pente est souvent de l'ordre de grandeur 10^{-2}), l'expression (2) se simplifie :

$$E_{S-G} = \frac{V_G}{M g \bar{h}} \quad (3)$$

Il faut remarquer que V_G peut correspondre au volume $V_1 - V_0$ représentant une extension volumétrique du système mesurée pendant la période $t = t_1 - t_0$.

Souvent les ravines présentent un profil transversal en U et

$$V_G = A_G \bar{h} \quad (4)$$

où A_G correspond à la surface ravinée (pour les ravines en forme de V, on écrit $V_G = A_G \bar{h}/2$).

Ainsi (3) se lira :

$$E_{S-G} = \frac{A_G}{A P g} = \frac{A_G}{A p_t t g} \quad (5)$$

Cette dernière expression de E_{S-G} est d'un grand intérêt pratique puisque le rapport A_G/A se déduit de données

planimétriques souvent disponibles (analyse de photos aériennes, ...). En outre, l'expression (5) met clairement en évidence l'importance de paramètres d'ordre planimétrique dans l'évaluation de la susceptibilité à l'érosion de bassins versants, ceci conformément aux principes énoncés dans l'introduction.

III. VALEURS E_{S-G} POUR DES RÉGIONS TROPICALES ET EXTRA-TROPICALES

Une littérature volumineuse a été parcourue en vue d'obtenir des données numériques applicables aux expressions (3) et (5). La récolte a été significative mais peu abondante, ce qui s'explique par le fait que la majorité des publications se concentrent sur certains processus de ravinement sans donner de précisions sur l'évolution diachronique et volumétrique du système considéré. Certains auteurs ont cependant pu dégager de leurs recherches un cadre chronologique qui souvent s'étend sur plusieurs années, voire sur des décennies d'observations. Quelquefois certaines données historiques ou des critères géologiques ont permis d'apprécier les effets d'un siècle

d'érosion ou de millénaires.

Il est évident qu'il existe toujours un certain degré d'imprécision dans les calculs de valeurs E_{S-G} . Les données pluviométriques sont souvent approximatives et, dans certains cas, on a été amené à déduire soi-même le rapport A_G/A d'une carte, publiée à petite échelle, ce qui revient à introduire des estimations qui comportent une marge d'erreur appréciable. Les écarts sur les valeurs E_{S-G} présentées dans la figure 2 reflètent donc des incertitudes propres à la manipulation des paramètres prévus par les expressions (3) et (5). La figure 2 sépare les données en deux domaines :

1. les régions tropicales humides ou subhumides allant des forêts et savanes dégradées aux savanes steppiques dégradées du Lesotho et du Burkina Faso.
2. les régions arides, semi-arides et tempérées : bassins versants désertiques et steppiques, bassins versants cultivés (Europe, Chine, Etats-Unis), badlands et ravinelements de zone montagneuse en France (Alpes du Sud, Cévennes).

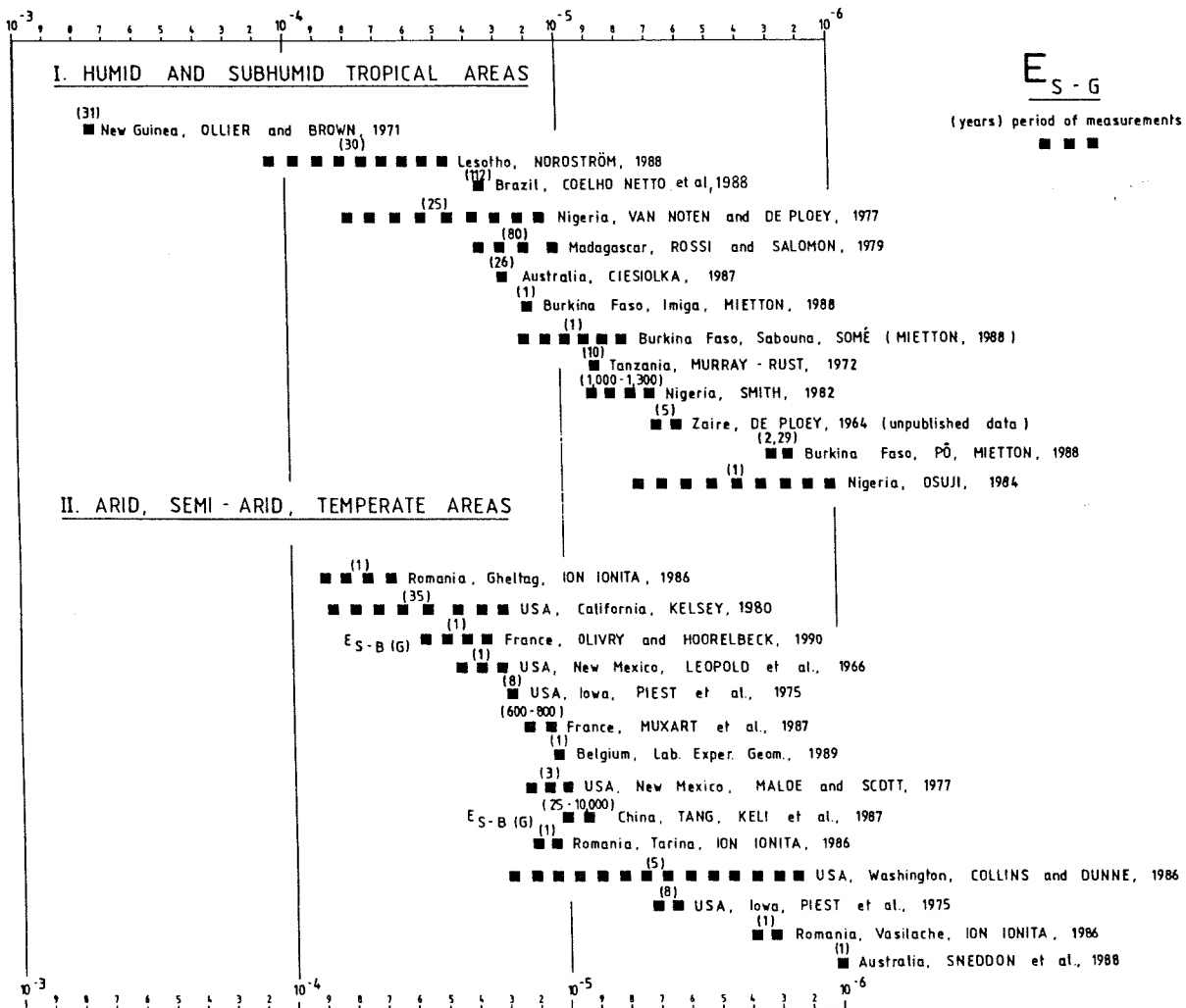


Figure 2 : Valeurs de E_{S-G} pour différents domaines climatiques.

Ci-dessous, deux exemples de calculs :

1. Bassin versant d'Imiga, près de la ville de Zorgo, Burkina Faso (MIETTON, 1988). Ravine de talweg ($\bar{h} = \pm 1$ m) dans une savane boisée dégradée par une mise en culture intensive. Sols : limons sablo-argileux, ferrugineux et durcis. Mesures de l'extension régressive de la ravine pendant la période de mars 1982-juillet 1983 (A_G). Calcul selon l'expression (5) :

$$E_{S-G} = (A_G = 624 \text{ m}^2)/(A = 5\,300\,000 \text{ m}^2) \times (P = 0,56 \text{ m}) \times (g = 10 \text{ m/s}^2)$$

$$E_{S-G} = 2,1 \times 10^{-5} \text{ s}^2/\text{m}^2.$$

2. Plateau loessique du nord de la Chine, bassin de drainage de la rivière Xingzihe (TANG KELI *et al.*, 1987). Gorges entaillées dans le plateau sur une profondeur de l'ordre de 250 m. Ravinements intenses et mouvements de masse sur des versants raides en culture. Précipitations moyennes annuelles $P = 0,51$ m. Perte de terre moyenne annuelle /km², $V_G/A = 11700 \text{ m}^3/10^6 \text{ m}^2$. Calcul selon l'expression (3) :

$$E_{S-B[G]}, (B = \text{badlands}) = V_G = 11\,700 \text{ m}^3/(A = 1\,000\,000 \text{ m}^2) \times (P = 0,51 \text{ m}) \times (g = 10 \text{ m/s}^2) \times (\bar{h} = 250 \text{ m})$$

$$E_{S-B[G]} = 9,1 \times 10^{-6} \text{ s}^2/\text{m}^2.$$

IV. DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'exemple des deux bassins versants précités montre que des valeurs E_{S-G} assez convergentes ont été obtenues pour des scénarios totalement différents. Le relief et les phénomènes d'érosion dans les gorges loessiques chinoises sont beaucoup plus impressionnants que la ravine de talweg au Burkina Faso. Que les deux valeurs E_{S-G} se rapprochent s'explique néanmoins par le fait que E_{S-G} y représente le rapport entre volumes érodés/énergie totale engagée. L'érosion brutale en Chine engage aussi une quantité d'énergie énorme et, selon le calcul, la susceptibilité à l'érosion par ravinement du bassin versant au Burkina Faso est légèrement supérieure à celle du système chinois puisque le rapport volumes érodés/énergie totale engagée y est un peu plus grand.

La figure 2 montre que les données d'un ensemble de 27 sites à travers le monde s'inscrivent dans un écart maximal allant de 10^{-4} à 10^{-6} . Mais on note également un écart plus restreint, entre 6×10^{-6} et 3×10^{-5} , qui représente une majorité importante (20/27) des valeurs E_{S-G} . L'ensemble des données est centré autour d'une moyenne globale, égale à 10^{-5} , et le classement obtenu pour les domaines climatiques I et II est fort semblable. Une analyse plus poussée des données s'impose afin d'examiner des corrélations possibles avec des facteurs majeurs qui peuvent influencer le classement des valeurs E_{S-G} .

Rien ne permet de conclure à un impact important de la nature litho-pédologique des substrats sur ce classement. A notre avis, cela tient à plusieurs effets compensatoires qui interviennent à ce niveau. Il est à noter, avant tout,

que les ravines s'entaillent souvent dans des strates ou des horizons pédologiques de composition variée. Bon nombre de données concernent des substrats à composition texturale allant de sables limoneux à des unités assez argileuses en passant par des limons franchement silteux (par ex. des loess). Or le ravinement résulte de l'action combinée de l'érosion hydraulique et de mouvements en masse qui agissent sur les parois. Ceci fait également intervenir des effets compensatoires. Les faciès sableux, y compris les limons silteux, sont relativement plus sensibles à l'érosion hydraulique que les faciès argileux. Par contre, ces derniers se caractérisent généralement par une résistance plus faible au cisaillement. Considérée à long terme, cette situation peut engendrer une évolution A_G/A ou V_G/\bar{h} convergente. Des horizons endurcis peuvent entraver une incision verticale mais cet effet est souvent compensé par une érosion latérale plus prononcée.

Les données ne révèlent pas d'impact différentiel net du facteur relief. Mais il faut au préalable noter que 19/27 des valeurs E_{S-G} concernent des bassins versants à ravines de talweg, formées en fonction d'une pente longitudinale plutôt faible. La formation de ravines de versant se limite aux cas suivants : Nouvelle-Guinée (OLLIER et BROWN, 1971), Tanzanie (MURRAY-RUST, 1972), Zaïre (DE PLOEY, 1964), Etats-Unis, Californie (KELSEY, 1980), France, badlands (OLIVRY et HOORELBECK, 1990), France, Cévennes (MUXART *et al.*, 1987), Chine (TANG KELI *et al.*, 1987), Etats-Unis, Mt Helens (COLLINS et DUNNE, 1986). Les valeurs E_{S-G} de ces sites se retrouvent dispersées à travers l'ensemble des données sans se grouper du côté des valeurs maximales ; ce qu'on aurait pu escompter. Il est vrai que le site volcanique très raviné de la Nouvelle-Guinée présente la cote la plus élevée mais il est impossible de conclure à un impact prépondérant du facteur pente plutôt que d'imputer cela à l'agressivité des pluies et/ou à l'absence de végétation lorsque les ravinements ont débuté en 1937.

On constate de même qu'il n'y a pas de corrélation nette et évidente entre E_{S-G} et la pluviométrie. Les valeurs de P se rattachent d'une façon aléatoire au classement proposé de l'indice de susceptibilité à l'érosion des bassins versants.

Le seul facteur qui semble avoir un impact réel sur le classement est finalement celui de la densité du tapis végétal, de la biomasse végétale qui intervient dans :

1. l'interception et l'infiltration des eaux pluviales et donc dans le volume du ruissellement,
2. la stabilité relative des parois de ravines pour autant que l'ensemble des ravines renforce la résistance au cisaillement du substrat ("root strength").

Dans le domaine tropical, les valeurs maximales de E_{S-G} , au-dessus de 3×10^{-5} , correspondent aux sites suivants : Nouvelle-Guinée, pentes volcaniques initialement dépourvues de végétation ; Lesotho, savanes substepmiques fortement dégradées par l'activité anthropi-

que; Brésil, savane herbeuse dégradée par l'élevage extensif; Nigéria, ravinements dans le bassin de la Gongola complètement déboisé pour la culture du coton. Par contre, des valeurs minimales, en dessous de 7×10^{-6} s'appliquent aux sites suivants : Zaïre, savane herbeuse assez dense, partiellement mise en culture; Burkina Faso (Pô), savane boisée, partiellement mise en culture; Sud Nigeria, zone forestière, localement mise en culture. Dans le domaine II du côté des valeurs maximales, au-dessus de 3×10^{-5} , notons : Roumanie (Gheltag), terres de grandes cultures; Etats-Unis, Californie, bassins versants à prairies dégradées; France, badlands dans les Alpes du Sud; Etats-Unis, New Mexico, milieu désertique. Des valeurs minimales, en dessous de 7×10^{-6} , concernent Etats-Unis, Iowa, terres de grandes cultures; Roumanie (Vasilache), terres de grandes cultures à sol chernozem; Australie, prairies denses.

Le cas des terres labourées (Roumanie, Iowa, Belgique, Chine) requiert une interprétation particulière. En effet, contrastant en cela avec les régions à végétation naturelle ou semi-naturelle pérenne, les terres de grandes cultures se caractérisent par une susceptibilité à l'érosion qui varie en fonction des saisons puisque l'état structural de surface et la couverture des sols par les plantes cultivées dépendent d'une évolution saisonnière. En Europe, une forte averse au mois de mars causera un ravinement beaucoup plus prononcé que la même averse intervenant à la fin du mois de juillet. Cette dynamique pédobotanique saisonnière explique vraisemblablement la dispersion remarquable de valeurs E_{S-G} pour des sites roumains (3) et américains (2) qui appartiennent à la même unité géographique. Une analyse approfondie de la situation se heurte généralement au fait que les auteurs sont rarement bien informés sur la chronologie d'orages locaux à grande puissance érosive. Mais, de notre expérience en Belgique, nous savons que la répartition apparemment aléatoire des orages joue un rôle primordial dans les distributions spatiale et diachronique de l'érosion linéaire, considérée comme phénomène singulier ou à court terme. Finalement, il est à noter que l'éventail des valeurs E_{S-G} des régions tropicales humides et subhumides est légèrement décalé vers la droite en comparaison avec la position moyenne des sites du domaine II. Là également on suppose que, pour le premier domaine, c'est le facteur végétal qui explique essentiellement une susceptibilité à l'érosion par ravinement légèrement inférieure à celle des régions désertiques, semi-désertiques et pleinement cultivées en "openfield".

V. APPLICATIONS DE E_{S-G}

Un choix judicieux de valeurs E_{S-G} nous permet de prédire la vitesse de développement d'une ravine ou d'un système de ravines dans un domaine précis. En effet, des expressions (3) et (5) on déduit :

$$A_G = E_{S-G} APg \quad (6)$$

ou

$$\frac{A_G}{A} = E_{S-G} Pg \quad (7)$$

ou encore

$$V_G = E_{S-G} APg\bar{h} \quad (8)$$

En principe, l'application de l'expression (8) sera plus délicate puisqu'elle implique une prévision de la profondeur moyenne \bar{h} du système sur la base d'une interprétation géomorphologique des données du terrain. L'âge d'un système se déduit de la relation

$$t = \frac{A_G}{E_{S-G} Ap_t g} = \frac{V_G}{E_{S-G} Ap_t g \bar{h}} \quad (9)$$

En principe, c'est un âge minimal qui est prédit à partir de l'équation (9) puisque, en accord avec GRAF (1977), il est indiqué d'admettre que la vitesse de développement d'un système de ravines décroît en fonction du temps selon une fonction exponentielle; la relation linéaire (9) se situe donc "du bon côté" lorsqu'on est à la recherche de seuils minimaux, en prévenant toute surestimation.

Au terme de la discussion des résultats obtenus, nous proposons les seuils suivants applicables aux expressions (6) et (9) :

A. Pour le domaine I, tropical humide et subhumide :

1. zones forestières et savanes boisées partiellement dégradées par l'action anthropique, savanes herbeuses assez denses partiellement mises en culture :

$$E_{S-G} \text{ entre } 3 \times 10^{-6} \text{ et } 10^{-5}.$$

2. savanes substeppiques à couverture végétale clairsemée, zones forestières et savanes fortement dégradées voire complètement déboisées :

$$E_{S-G} \text{ entre } 10^{-5} \text{ et } 6 \times 10^{-5}.$$

B. Pour le domaine II :

1. terrains à couverture végétale pérenne et dense, prairies, plantes de culture pérennes :

$$E_{S-G} \text{ entre } 10^{-6} \text{ et } 3 \times 10^{-6}.$$

2. zones désertiques, steppiques et badlands :

$$E_{S-G} \text{ entre } 10^{-5} \text{ et } 6 \times 10^{-5}.$$

3. zones agricoles à dominance de terres labourées :

- valeur moyenne théorique à long terme :

$$E_{S-G} = 10^{-5};$$

- selon l'état du terrain à une certaine époque de l'année, donc prédiction à court terme (un orage, une période pluvieuse) :

$$E_{S-G} \text{ entre } 3 \times 10^{-6} \text{ et } 6 \times 10^{-5}.$$

Quelques exemples peuvent illustrer l'application de ces seuils selon les expressions (6) et (9) dont le premier but consiste évidemment à cerner des ordres de grandeur.

Exemple 1. Zone forestière tropicale à champs cultivés dispersés. $A = 1 \text{ km}^2 = 10^6 \text{ m}^2$. P annuel = 1,5 m. Aire AG ravinée après 20 ans (expression (6), E_{s-G} entre 3×10^{-6} et 10^{-5}); $AG = (0,000\ 003 - 0,000\ 010) \times 10^6 \times 30 \times 10 = 900 - 3\ 000 \text{ m}^2$, soit 0,09 — 0,3 % de la surface totale.

Exemple 2. Badlands en zone subtropicale. $A = 1 \text{ km}^2 = 10^6 \text{ m}^2$. P annuel = 0,5 m. $AG/A = 1$. Profondeur moyenne h des ravines : 8 m. Volume V_G érodé après 20 ans (expression (8), E_{s-G} entre 10^{-5} et 6×10^{-5}); $V_G = (0,000\ 010 - 0,000\ 060) \times 10^6 \times 10 \times 10 \times 8 = 8\ 000 - 48\ 000 \text{ m}^3$, soit entre 4 et $24 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{an}$.

Une interpolation plus précise de la valeur E_{s-G} , au sein des fourchettes indiquées ci-dessus, sera rendue possible, en principe, lorsqu'on comparera la géographie du site concerné à celle des sites aux valeurs E_{s-G} connues.

Le ravinement complet de bassins versants suppose $AG/A = 1$ et signifie leur transformation en badlands. Pour le bassin méditerranéen, on peut supposer que p_t se situe entre 0,25 et 0,75. Pour une valeur E_{s-G} maximale égale à 6×10^{-5} , on obtient, selon l'expression (9), l'âge minimal de ces badlands :

$$t = 1/0,00006 \times (0,25 - 0,75) \times 10 = 6\ 670 - 2\ 220 \text{ ans.}$$

Ce résultat s'oppose à l'hypothèse, parfois émise, d'un développement relativement rapide des badlands méditerranéens, essentiellement depuis l'époque post-romaine des grands déboisements. Il y a lieu de penser que l'âge de ces badlands pourrait même remonter aux périodes pré-holocènes car t acquiert une valeur de l'ordre de 10 000 ans lorsque E_{s-G} tend vers des valeurs 0,000 4 - 0,000 3. Notre conclusion rejoint celle de WISE *et al.* (1982) qui estiment que l'âge minimal des badlands espagnols est de l'ordre de milliers d'années.

VI. CONCLUSIONS

Le modèle E_s confronte les effets de l'érosion à une formulation applicable de l'énergie totale engagée dans les processus d'érosion. Son expression réhabilite en quelque sorte l'importance des aspects planimétriques de l'érosion sans négliger ses dimensions volumétriques. Cela ressort clairement de la discussion de l'expression E_{s-G} , spécifique pour les ravinements et le développement des badlands ($E_{s-B(G)}$). Appliquée à des scénarios bien différents, en provenance du monde entier, E_{s-G} révèle une convergence remarquable des résultats numériques. Ceci amène des réflexions sur les effets compensateurs qui influencent l'érosion au niveau des bassins versants. Dans l'avenir, ce point méritera plus d'attention de la part des chercheurs.

L'impact discriminatoire du facteur lithopédologique semble être secondaire lorsqu'on considère une évolution de système de ravines à long terme. Le rôle du facteur gradient de pente n'est ni évident ni clair mais probablement aussi d'un intérêt secondaire. Il semble pour le moment que la densité et la physionomie du tapis

végétal soit de première importance en vue d'expliquer la variabilité des valeurs E_{s-G} obtenues. Sur la base des données disponibles, il a été proposé une série de seuils qui visent à la prédiction de vitesses de développement de ravines dans un bassin versant. Des calculs volumétriques sont également possibles mais ils requièrent une estimation préalable du facteur h sur base de données du terrain.

Finalement, l'examen de E_{s-G} nous a conduit à une première évaluation de l'âge des badlands méditerranéens, lequel semble parfois avoir été sous-estimé.

Une discussion ultérieure plus élaborée de E_{s-G} dépend d'une plus ample récolte de données empiriques mais également d'une connaissance plus approfondie des processus majeurs qui régissent le développement de ravines. Ceci permettra d'affiner la portée prévisionnelle du modèle.

VII. REMERCIEMENTS

L'auteur remercie J. Poesen, G. Govers et D. Goossens, du laboratoire de Leuven, pour leur contribution à la discussion des résultats du modèle E_s .

VIII. BIBLIOGRAPHIE

- CIESOLKA, C., 1987. Catchment management in the Nogoja Watershed. *Austr. Water Res. Council*, Project 80-128, 204 p.
- COELHO NETTO, A.L., FERNANDES, N.F. and DE DEUS, C.E., 1988. Gullying in the southeastern Brazilian Plateau, Bananal (SP), *IAHS Publ.*, 174: 35-42.
- COLLINS, B.D. and DUNNE, Th., 1986. Erosion of tephra from the 1980 eruption of St Helens. *Bull. geol. Soc. Amer.*, 97 : 896-905.
- DE PLOEY, J., 1964. Cartographie géomorphologique et morphogénèse aux environs du Stanley-Pool (Congo). *Acta geogr. Lovaniensia*, 3 : 431-443.
- DE PLOEY, J., 1990. Threshold conditions for thalweg gullying with special reference to loess areas. *Catena Suppl.*, 17 : 147-151.
- conservation treatments in the Birlad Tablelands. *Z. Geomorph.*, Suppl. Bd., 58 : 107-119.
- KELSEY, H.M., 1980. A sediment budget and an analysis of geomorphic process in the Van Duzen River Basin, north coastal California, 1941-1975, *Bull. geol. Soc. Amer.*, 91 : 190-195.
- LEOPOLD, L.B., EMMET, W.W. and MYRICK, R.M., 1966. Channel and hillslope processes in a semi-arid area New Mexico. *Geol. Survey prof Paper*, 352-G : 193-253.
- MALDE, H.E. and SCOTT, A.G., 1977. Observations of contemporary cutting near Santa Fe, New Mexico, U.S.A. *Earth Surface Processes* 2 : 39-42.

- MIETTON, M., 1988. *Dynamique de l'interface lithosphère-atmosphère en Burkina-Faso. L'érosion en zone de savane*. Thèse doct., Univ. Grenoble I, 485 P.
- MURRAY-RUST, D.H., 1972. Soil erosion and reservoir sedimentation in a grazing area west of Arusha, northern Tanzania. *Geogr. Ann.* 54 A (3-4) : 325-343.
- MUXART, T., COSANDAY, C., BILLARD, A. et VALADAS, B., 1987. Dynamique des versants et occupation humaine dans les Cévennes (Montagne du Lings). *Bull. Ass. Géogr. franç.*, 1 : 3-40.
- NORDSTRÖM, K., 1988. Gully erosion in the Lesotho lowland. Dept. of Phys. Geogr. Uppsala Univ., *Ungi Rapport* 69, 144 p.
- OLIVRY, J.C. et HOORELBECK, J., 1990. Erodibilité des terres noires de la vallée du Buéch (France, Alpes du Sud). *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, 25 (1-2) : 95-110.
- OLLIER, C.D. and BROWN, M.J., 1971. Erosion of a young volcano in New Guinea. *Z. Geomorph.*, Suppl. Bd., 18 : 12-28.
- OSUJI, G.E., 1984. The gullies of Imo. *Journ. Soil Water Cons.*, 39 (4) : 246-247.
- PIEST, R.F., BRADFORD, J.M. and WYATT, G.M., 1975. Soil erosion and sediment transport from gullies. *Journ. Hydraulics Div.* HY1, 65-80.
- Rossi, G. and SALOMON, J.N., 1979. Un exemple d'érosion accélérée à Madagascar : les sakasaka. *Z. Geomorph.*, 23 (3) : 271-280.
- SMITH, B.J., 1982. Effects of climate and land-use changes on gully development : an example from Northern Nigeria. *Z. Geomorph.*, Suppl. Bd., 44 : 33-51.
- SNEDDON, J., WILLIAMS, B.G., SAVAGE, J.V. and NEWMAN, C.T., 1988. Erosion of gully in duplex soils. Results of a long-term photogrammetric monitoring program. *Austr. J. Soil Res.*, 26 : 401-408.
- TANG KELI, XI DAOQING AND ZAHG PINCANG, 1987. The main types of soil erosion related to the characteristics of loess distribution : a representative basin of Xingzihe River. *Aspects of Loess Research* (Ed. Liu Tungsheng), China Ocean Press Beijing, 437-445.
- VAN NOTEN, F. and DE PLOEY, J., 1977. Quaternary research in northeastern Nigeria. *Ann. Mus. roy. Afr. centr. Tervuren Hum. Sc.*, 92, 61 p.
- WISE, S.M., THORNES, J.B. and GILMAN, A. 1982. How old are the badlands? A case from south-east Spain. *Badland geomorphology and piping* (Eds. Bryan, R. and Yair, A.), Geo-Books : 259-278.

Adresse de l'auteur : Jan DE PLOEY
 Laboratorium voor experimentele Geomorfologie
 Katholieke Universiteit Leuven
 Redingenstraat, 16bis
 B — 3000 LEUVEN