

# La lutte antiérosive conventionnelle en fonction des processus et des facteurs de l'érosion hydrique

Éric ROOSE

Dans ce chapitre, nous rappelons la variété des manifestations des divers processus d'érosion, les causes et les facteurs de ces processus, ainsi que les aménagements présentés dans les manuels conventionnels pour lutter contre l'érosion et une analyse critique de ces approches.

## L'érosion en nappe

### **La cause et les processus de l'érosion en nappe**

On parle d'érosion en nappe (ou aréolaire) lorsque l'énergie des gouttes de pluie s'attaque à toute la surface du sol et que le transport des matériaux arrachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par l'érosion hydrique (ROOSE, 1994). Elle est peu visible puisqu'une érosion de 15 à 30 t/ha/an correspond à une perte de hauteur de 1 à 2 mm : or les « sols respirent » comme en témoigne l'augmentation de leur densité apparente

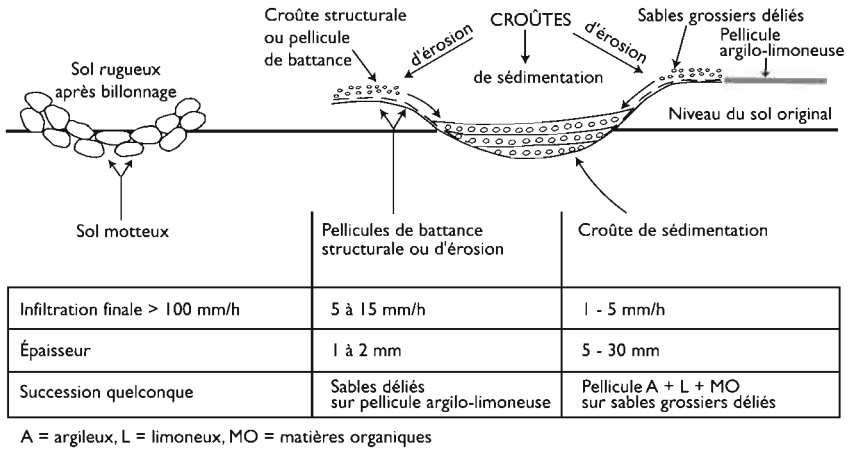


Fig. 3

Formation des pellicules de battance et des croûtes d'érosion et de sédimentation sous l'effet des gouttes de pluie (d'après ROOSE, 1994).

au cours de la saison des pluies et la surface oscille de plusieurs centimètres d'une saison à l'autre, ne fût-ce qu'après le labour ou suite au gonflement des argiles par hydratation. Cependant, les paysans n'observent-ils pas que « les cailloux poussent » ce qui veut dire qu'il y a érosion sélective des particules fines et légères (MO, argile et limons) et accumulation en surface des éléments grossiers résiduels (ROOSE, 1977).

La cause de l'érosion en nappe est l'énergie de battance des gouttes de pluie sur le sol dénudé (ELLISON, 1944). L'érosivité des pluies dépend à la fois de l'intensité maximale des pluies (durant 15 à 30 min) qui déclenche le ruissellement, du volume et de la durée des pluies (ou de l'humidité du sol avant l'averse) : elle se calcule à partir de régressions entre l'intensité des pluies et leur énergie (WISCHMEIER et SMITH, 1978 ; ROOSE, 1994).

L'énergie de battance est dissipée sur le sol selon cinq processus (fig. 3) :

- l'humectation brutale de la surface du sol et l'éclatement des agrégats ;
- le tassement de la surface du sol sous l'impact des gouttes ;
- l'arrachement tangentiel qui sépare les particules agrégées des mottes ;
- la projection de ces particules selon une couronne sur sol plat et transport dans toutes les directions, mais plus efficacement vers l'aval sur les pentes ;
- le bruit du choc des gouttes sur les matériaux résistants, et redistribution des particules vers les sommets des mottes (pellicules de battance) et vers les points bas (croûtes de sédimentation).

### Les indicateurs de l'érosion en nappe

Les traces laissées au sol par les divers types d'érosion traduisent l'efficacité locale des processus qui font appel à des sources d'énergie variées et à divers

facteurs qui modifient leur expression. Cependant, ces traces ne sont pas forcément pérennes : il y a souvent une évolution au cours de la saison des pluies et des années de culture d'une forme d'érosion vers une autre à mesure que la dégradation des terres progresse. Pour évaluer les risques d'érosion, on a développé toute une série de dispositifs susceptibles d'apporter des indications chiffrées sur l'efficacité de l'érosion en nappe, la vitesse de progression des ravines et des mouvements de masse à certaines échelles d'espace et de temps (LAL, 1988 ; ROOSE, 1994). Ces mesures très utiles sont menées sur de longues périodes à cause des variations climatiques annuelles. Elles sont donc coûteuses en personnels : elles ont donné naissance à des bases de données utilisées pour modéliser les tendances évolutives à moyen terme (20 ans pour le modèle USLE décrit plus loin) des zones à pentes moyennes (2 à 25 % de pente), pour définir les techniques de lutte antiérosive à mettre en place pour maintenir une terre cultivée sous un niveau d'érosion acceptable ( $E = 1$  à 15 t/ha/an).

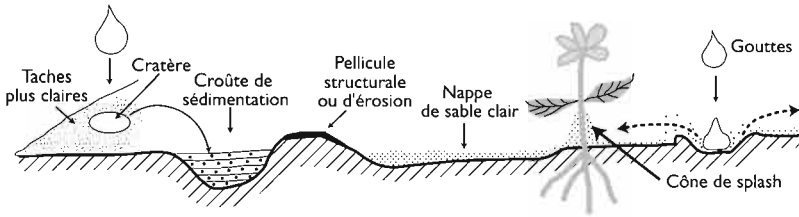
Avec l'urgence de trouver des solutions aux problèmes d'érosion, la tendance actuelle est d'évaluer, pour chaque segment fonctionnel des versants, des indicateurs faciles à repérer à la surface du sol (mémoire des attaques par les pluies et le ruissellement). Ces indicateurs sont situés dans l'espace à l'aide de GPS. On les combine ensuite aux facteurs les plus significatifs du paysage pour définir les risques d'érosion et d'inondation (pente, nature du sol, etc.). Ces indicateurs d'état de la surface du sol renseignent sur les réactions du sol aux pluies passées, mais informent du même coup sur les risques d'érosion dans le futur, tout au moins à titre comparatif, des diverses utilisations des terres, des pentes, des techniques culturales et de l'histoire des parcelles situées sur le versant (BARTHÈS et ROOSE, 2002 ; CHEGGOUR *et al.*, 2008).

À un stade initial, l'érosion en nappe (bien que modeste : quelques t/ha/an), combinée à l'érosion aratoire (par les outils), peut décaper la majorité de l'horizon humifère en quelques dizaines d'années : d'où la présence de plages de couleurs claires aux endroits les plus décapés du versant (haut des collines et rupture de pente convexe).

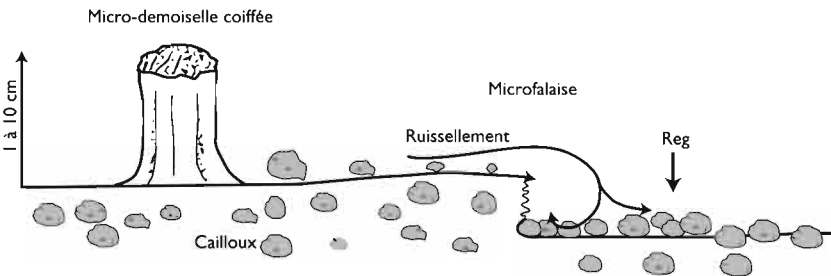
La battance des gouttes de pluie sur la surface irrégulière d'un sol labouré entraîne le tassement de la surface du sol, l'arrachement et la projection dans toutes les directions des particules arrachées, laissant sur place des voiles de sable, blanc en milieu acide, rosé ou roux si les sables sont ferrugineux, des cratères sombres dans ces voiles sableux délavés (reliquat de la chute des dernières grosses gouttes de la dernière averse), des « délaissés de crues » (litières et MO diverses accrochées aux buissons, mottes et cailloux) et des colonnettes de terre projetée par la pluie sous les feuilles larges qui protègent le sol nu de la battance.

À un stade avancé, l'érosion en nappe prend la forme de demoiselles coiffées, petits piédestals de terre coiffés d'un objet dur résistant à l'attaque des gouttes (graine, racine, feuille, fumier, cailloux ou simples croûtes de terre tassée protégés par des lichens). Leur hauteur (0,5 à 15 cm) est d'autant plus élevée que l'érosion est forte, le sol nu et fragile, et la pente raide. Ces colonnettes de terre

A) Effets splash : taches plus claires, cônes sous les feuilles, nappes de sable clair



B) Décapage : demoiselles coiffées, microfalaises et reg de cailloux



C) Dépôts : délaissés de crue (matières organiques), nappes de sable

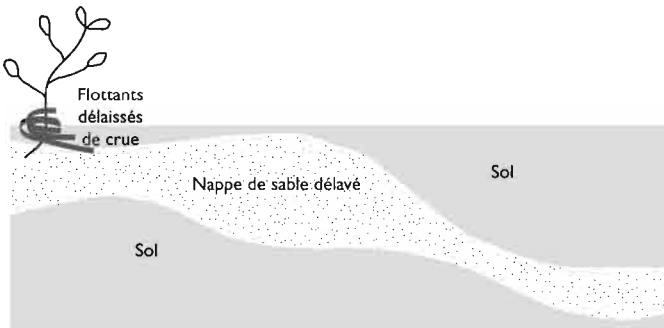


Fig. 4

Les indicateurs de l'érosion en nappe (d'après ROOSE, 1977).

prouvent que l'énergie des gouttes de pluie attaque la surface du sol et que le ruissellement emporte les particules fines détachées mais que son énergie n'est pas assez forte pour cisailer la base des colonnettes ou déplacer les cailloux. Dans les sols caillouteux, l'érosion en nappe concentre en surface un voile de cailloux semblable à un reg.

Dès que le ruissellement devient abondant, il se hiérarchise et accumule assez d'énergie pour entailler la base des demoiselles coiffées, creuser des griffes (1 à 10 cm de profondeur), des rigoles (10 à 50 cm de profondeur) qui évoluent en ravines (> 50 cm) (ROOSE, 1977).

## Les conséquences de l'érosion en nappe

L'érosion en nappe modifie progressivement la surface rugueuse d'un champ labouré et on peut observer :

- le nivellement de la surface du sol par rabotage des mottes et remplissage des creux, avec formation de pellicules de battance (épaisseur = 1 mm), de croûtes d'érosion et de sédimentation (plusieurs couches dépassant 1 à 30 mm).
- la squelettisation des horizons superficiels par perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche de sables et graviers, plus claire que le sol initial ;
- le décapage de l'horizon humifère laissant apparaître des plages de l'horizon minéral de couleur plus claire de l'horizon minéral B ou C.

## Les facteurs modifiant l'érosion en nappe

D'après le modèle empirique USLE (Universal Soil Loss Equation) de WISCHMEIER et SMITH, 1960, 1978, l'érosion en nappe est fonction du produit de l'énergie des pluies locales (R) par un ensemble de facteurs de résistance du milieu, à savoir le couvert végétal (C), la pente (SL), l'érodibilité du sol (K), les techniques antiérosives (P).

$$\text{Érosion moyenne} = R \times C \times SL \times K \times P$$

### *L'érosivité des pluies (R)*

Plus les pluies sont abondantes et intenses, plus elles libèrent une énergie cinétique et développent une agressivité destructrice des agrégats : ceux-ci seront d'autant plus fragiles que le sol est très sec (explosion des agrégats) ou très humide (faible cohésion) :

$$R_{am} = P_{am} \times 0,5 \pm 0,05$$

où  $P_{am}$  = la pluviosité annuelle moyenne (en mm) sur 10 ans et  $R_{am}$ , l'indice d'érosivité annuel moyen des années correspondantes.

En milieu aride, pour des pluies annuelles moyennes < 200 mm, l'indice d'érosivité moyen est :

$$R_{am} < 20 \pm 1$$

En milieu méditerranéen montagnard humide où  $P_{am} < 1\ 200$  mm :

$$R_{am} < 120 \pm 6$$

Cependant, la plupart des averses en zone de montagne méditerranéenne ont une faible intensité et une faible énergie : les risques majeurs sont liés à des averses de fréquence rare, soit des orages très violents lors des changements de saison, soit des pluies longues et saturantes provoquant des inondations considérables, des mouvements de masse, du ravinement torrentiel et la dégradation des berges des oueds.

### *La couverture du sol par les végétaux et les cailloux (C = 0,001 à 1)*

Le facteur qui réduit le plus l'érosion potentielle due à l'énergie développée par les pluies est la surface du sol recouverte par la canopée des végétaux (importance

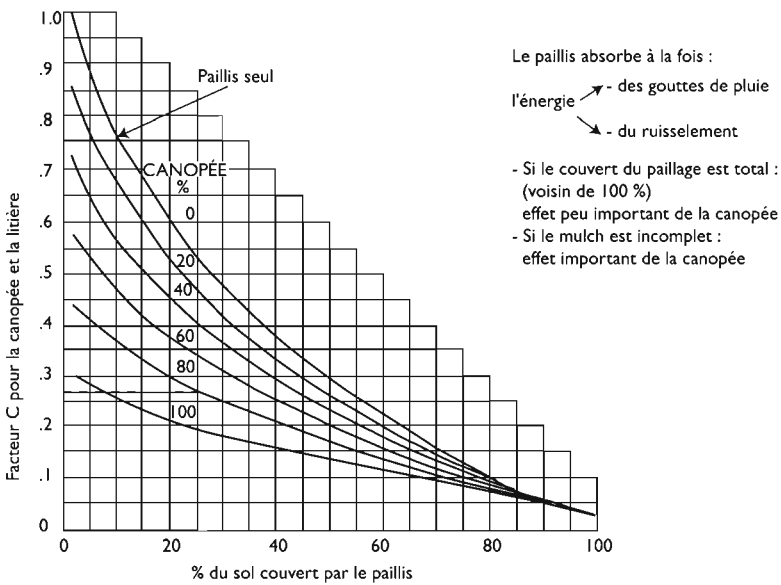


Fig. 5  
 Influence de la hauteur de la couverture du sol sur les risques d'érosion  
 (d'après WISCHMEIER et SMITH, 1978).

de la densité et époque de plantation), mais plus encore par toute végétation qui rampe à la surface du sol (adventices, mousses, plantes de couverture, litières, résidus de cultures, produit de la taille des arbres). Plus la canopée est haute et moins elle protège la surface du sol contre la battance car les gouttes d'eau accumulées au bout des feuilles reprennent très vite de la vitesse et de l'énergie (WISCHMEIER et SMITH, 1960 ; fig. 5).

L'influence des cailloux est plus complexe. Les cailloux qui pointent à la surface du sol dissipent l'énergie des gouttes et réduisent l'érosion. Par contre, les cailloux enfouis près de la surface ou dans la croûte de battance augmentent le ruissellement car les cailloux sont beaucoup moins poreux que le sol. Enfin, les cailloux posés sur des surfaces mottes retardent la destruction des agrégats qu'ils protègent et favorisent l'infiltration.

La plantation précoce et dense, de même que l'usage raisonné des engrais réduisent la surface dénudée (bon indicateur de l'érosion) du sol et les risques d'érosion. Les cultures associées ou décalées, l'agroforesterie, le paillage et la gestion des adventices (séchées sur place), le choix de variétés vigoureuses ou rampantes forment autant d'obstacles à l'énergie des pluies et du ruissellement, donc des pièges à sédiments.

Le travail du sol améliore l'infiltration d'autant plus temporairement que le sol est instable, mais il dénude la terre et la rend très sensible à la battance (LAL, 1976 ; ROOSE, 1977).

Le labour enfouit les adventices, mais ramène en surface des horizons profonds moins humifères, plus érodibles et riches en graines d'adventices enfouies durant le cycle précédent. En augmentant la porosité du sol, il améliore l'infiltration, mais la pression sur la semelle de labour ( $p = 3 \text{ kg/cm}^2$ ) écrase la macroporosité nécessaire pour l'infiltration des eaux. En définitive, c'est dans la forêt qu'on trouve les meilleures conditions physiques de stabilité structurale, d'agrégation, d'infiltration, d'enracinement et pourtant on n'y a jamais passé la charrue (ROOSE, 1977, 1981, 1994). Les paysans ne s'y trompent pas qui traditionnellement défrichent la forêt et sèment directement, sans travailler le sol, du riz en Côte d'Ivoire ou à Madagascar.

D'où l'idée de réduire le travail du sol : travail à la dent limité à la ligne de semis qui respecte la litière sur le reste de la surface, ou semis direct sous la litière d'adventices, de résidus de culture ou sous des plantes de couvertures.

Pour se rapprocher du système forestier, on combine la culture de plantes à racines profondes (arbustes de légumineuses) qui ramènent les nutriments en surface, à des plantes qui couvrent bien la surface ou laissent suffisamment de résidus de culture en litière pour couvrir plus de 50 % de la surface du sol.

Il existe de nombreuses raisons pour justifier la pratique des feux de brousse qui parcourent les espaces surpâturés, détruisent quantité de nuisibles ainsi que les plantes peu appétantes envahissant les parcours, régénèrent les herbacées, recyclent les nutriments fixés dans les vieilles plantes desséchées, minéralisent les matières organiques et augmentent d'une unité le pH de l'horizon superficiel. En desséchant la surface du sol, le feu l'a rendu hydrophobe : la surface brûlée produit alors beaucoup de ruissellement qui peut être utile ailleurs pour démarrer le nouveau cycle végétatif des parcours ou des pépinières (de riz à cycle long). Par contre, le feu répété a un impact négatif sur la biodiversité (destruction des jeunes semis, développement sélectif des arbres pyrophiles), sur la MO, l'azote et le carbone du sol et par conséquent sur toutes les propriétés liées à la MO du sol. Les surfaces brûlées augmentent temporairement le ruissellement et sa charge solide jusqu'à ce que la nouvelle végétation ait recouvert la plaie. L'époque et l'intensité du feu sont très importantes. Les feux précoces parcourent rapidement la surface du sol sans détruire les souches des graminées pérennes et sans s'acharner sur les troncs des arbres : la surface reverdit avant même le retour des pluies. Par contre, un feu tardif allumé par temps calme va brûler les souches des graminées et les branches des jeunes arbres, réduire pour longtemps le couvert végétal qui s'éveillait à la nouvelle saison des pluies (ROOSE, 1978).

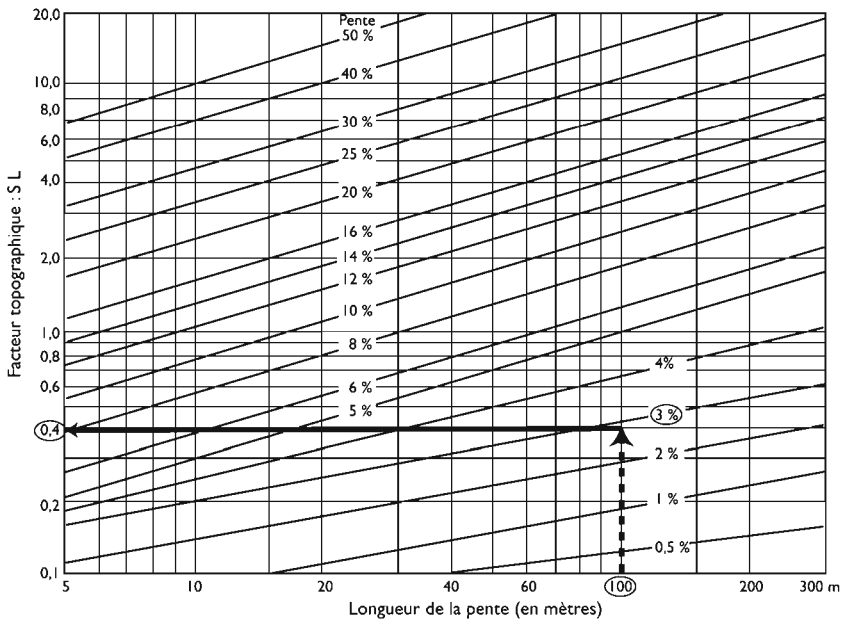
Le pâturage par les troupeaux d'ovins et caprins (pression aux sabots = 2 à 3  $\text{kg/cm}^2$ ) et surtout par les vaches et chevaux (pression aux sabots de 6 à 7  $\text{kg/cm}^2$ ) entraîne le tassement des chemins qu'ils empruntent et un ruissellement abondant des parcours se traduisant souvent par le ravinement des terres cultivées sous-jacentes (SABIR *et al.*, 1996).

En conclusion, quelle que soit la pente, la fragilité du sol, les techniques culturales, le type de végétation et sa composition botanique, pourvu qu'il couvre plus de 80 % de la surface du sol, le couvert végétal assure une excellente conservation

de l'eau et des sols. Mais en zone semi-aride méditerranéenne où les pluies agressives tombent en début de saison froide (septembre-novembre) ou en fin de saison culturale (avril-mai), il n'est pas toujours facile de recouvrir le sol de résidus végétaux : le travail grossier du sol en courbe de niveau et les cailloux étalés en surface peuvent compléter la couverture du sol par des litières végétales.

**La pente (SL varie de 0,1 à 20)**

Dès l'origine de la lutte antiérosive, la pente par sa longueur, son inclinaison, sa forme a été perçue comme l'un des facteurs principaux des risques de ruissellement et d'érosion. Il en a découlé de nombreuses méthodes de réduction de l'inclinaison de la pente (terrasses en gradins ou progressives), de la longueur de pente (gros billons et banquettes, haies vives, cordons de pierres, bandes enherbées, labour et billonnage en courbe de niveau), de la forme de la pente (terrasses progressives, talus limitant les parcelles). Ce n'est que récemment qu'on s'est aperçu que la position topographique dans le paysage, en particulier méditerranéenne, était parfois plus importante que la pente elle-même (HEUSCH, 1970 ; ROOSE, 1994). En sont témoins les ravines remontantes à partir de la résurgence du drainage hypodermique au contact d'une roche imperméable comme les marnes ou les ravines remontantes à partir du coude d'une rivière au pied d'une colline. L'existence de ruissellement et d'érosion intense sur des glacis en pente



- Pour estimer rapidement le facteur topographique (SL) :
- Entrer par la longueur de pente en abscisse (ex. 100 m)
  - Remonter verticalement jusqu'à la courbe de pente (ex. 3%)
  - Suivre vers la gauche horizontalement jusqu'à l'ordonnée (ici SL = 0,4)

Fig. 6

Facteur topographique (d'après WISCHMEIER et SMITH, 1978).



douce indique par contre qu'il n'est pas besoin d'une forte pente (1-2 %) pour déclencher ces phénomènes (FAUCK, 1956 ; FOURNIER, 1967 ; ROOSE 1994).

Dans le modèle USLE, le facteur topographique tient compte essentiellement de la longueur et surtout de l'inclinaison de la pente :

$$SL = (0,76 + 0,53 S + 0,076 S^2) \times L^{0,5}/100$$

où SL est le facteur topographique de l'érosion, L étant la longueur de la pente (en pieds) sans obstacle contre le ruissellement et S l'inclinaison en % de pente.

### *L'érodibilité des sols (K = 0,01 à 0,40)*

La résistance des sols à la battance des pluies se mesure sur des parcelles en jachère nue travaillée depuis plus de 3 ans : l'indice d'érodibilité varie de K = 0,01 pour les sols les plus résistants à K = 0,40 pour les sols moyennement fragiles et 0,70 pour les sols les plus fragiles. Au Maroc, l'érodibilité des sols varie de 0,01 pour les lithosols caillouteux, les vertisols calciques, à 0,2 à 0,3 pour les sols bruns calcaires et les sols rouges fersiallitiques lessivés et 0,3 à 0,4 pour les sols sableux dégradés, décapés sur grès et les horizons de roche altérée limono-sableux (MERZOUK, 1990 ; ROOSE et SARRAILH, 1989 ; ROOSE *et al.*, 1993).

Plus les sols sont riches en cailloux, en matières organiques, en argile saturée en calcium, plus le taux de macro-agrégats stables (> 200 microns), est élevé, plus la couverture pédologique est résistante à l'agressivité des pluies. Plus les sols sont riches en sables fins et en limons, en sodium échangeable ou en sel, plus les agrégats sont instables et le résultat du travail du sol poudreux (hersage et labour à disques), plus vite se forme une croûte de battance et se développent du ruissellement et des pertes en sols. L'amélioration de la structure, de la stabilité des agrégats est longue et difficile car l'apport de MO est rapidement minéralisé dans ces milieux chauds et humides. Pour améliorer le stock de carbone et les propriétés qui en dépendent, il faut jouer sur les rotations produisant beaucoup de résidus de culture et les gérer à la surface du sol. Par ailleurs, on peut réserver les sols les plus stables aux cultures sarclées peu couvrantes et les sols fragiles aux cultures pérennes (légumineuses fourragères, arboriculture, plantations arborées fruitières, fourragères ou forestières).

Sur pentes faibles, le taux de MO et d'argile + R<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + taux Ca<sup>+</sup> règlent la sensibilité du sol à la battance, au ruissellement et à l'érosion.

Sur pentes fortes, la stabilité des agrégats a moins d'importance ; le transport des agrégats par les rigoles est important et c'est le taux de saturation du sol par l'eau avant la pluie qui est responsable du ruissellement et par la suite de l'érosion linéaire. La capacité moyenne de stockage en eau varie avec la capacité d'infiltration et de stockage de l'eau : pour mouiller 10 mm de sol riche en kaolinite, il faut environ 1 mm de pluie, 4 mm de pluie sur argile gonflante (smectites) et 10 mm sur la matière organique. D'où l'intérêt d'entretenir le niveau de carbone du sol (donc de l'agrégation et de l'infiltration) près de son niveau optimal en surface par des systèmes de culture qui produisent beaucoup de biomasse, une abondante litière en surface et des techniques culturales qui ne perturbent pas trop cette litière précieuse (ROOSE, 1994).

Les pratiques culturales antiérosives ( $P = 1 \text{ à } 0,1$ )

Le labour a temporairement (pour des averses de moins de 120 mm) une influence favorable sur l'infiltration des eaux de pluie tant qu'on évite la création d'une pellicule de battance. Un labour grossier ou un billonnage en courbe de niveau améliore la rugosité du sol qui va stocker les eaux et sédiments : le facteur P jusqu'à 10 % de pente varie de 0,1 à 0,7 selon la pente et l'importance de la rugosité de la surface du sol. Mais dès que les pentes dépassent 15-25 % et 30 à 100 m de longueur, le facteur P du billonnage en courbe de niveau tend vers 1 et la rugosité perd de son efficacité. Sur faible pente, le billonnage cloisonné peut réduire au 1/10 les risques d'érosion : cependant la surface du sol se dégrade (accumulation de sables stériles) en même temps que les MO du sol minéralisent rapidement.

Récemment, l'intérêt du « labour de conservation » (qui préserve au moins 30 % de la surface couverte par les résidus de culture ou les adventices basses) et surtout du semis direct sous litière (découpage d'un sillon étroit où sont enfouis les engrais, pesticides et graines) a beaucoup progressé en Amérique latine et en Amérique du Nord. Tant que ces préparations du sol laissent en surface une

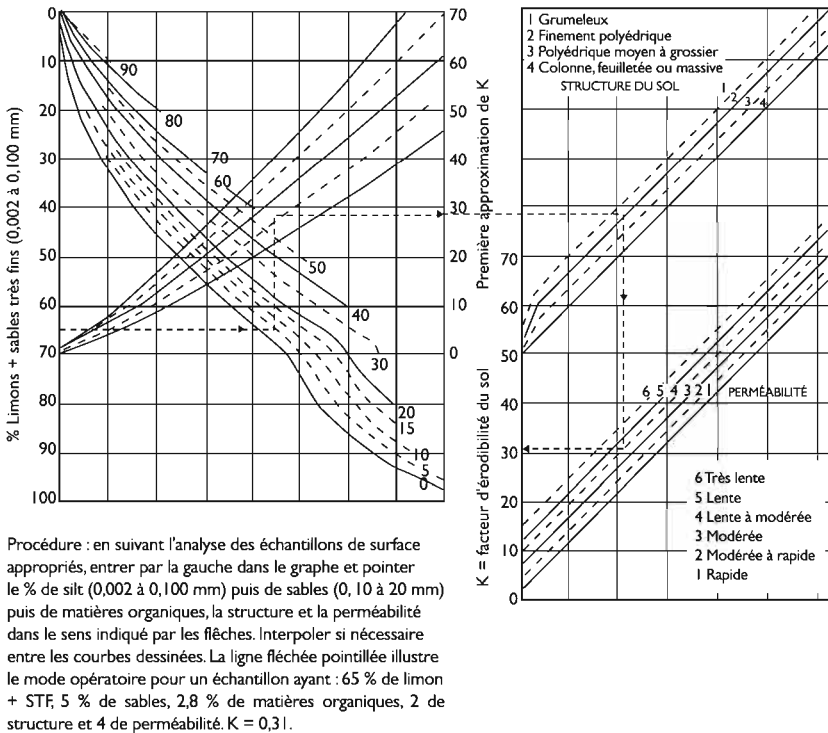


Fig. 7

Nomogramme permettant d'évaluer rapidement le facteur K d'érodibilité des sols (d'après WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS, 1971).

litière couvrant la majorité de la surface du sol, les pertes en terres et en eau sont profondément réduites (ROOSE et CAVALIÉ, 1988 ; MRABET *et al.*, 2004 ; DIALLO, BOLI et ROOSE, 2008).

### **La lutte contre l'érosion en nappe**

La lutte contre l'érosion en nappe peut être abordée soit par l'absorption d'une partie de l'énergie des pluies soit en améliorant les conditions de résistance du milieu.

**Couvrir le sol** : il s'agit avant tout de développer une agriculture intensive couvrant le sol le mieux possible : semis dense, précoce, culture mélangée, agroforesterie, plantes rampantes entre les plantes dressées, avec plantes de couverture, légumineuses intercalaires, gestion des adventices herbicides et laissées sur place, gestion des résidus de culture sur la surface du sol (mulch), apport de paillage ou mulch de cailloux accumulés au-dessus du sol...

La fertilisation raisonnée et le paillage peuvent aussi favoriser une croissance rapide et une bonne couverture du sol. Étaler en surface un mulch de cailloux est aussi très efficace pour réduire l'énergie des pluies et du ruissellement.

**Améliorer la porosité et la structure du sol** : le travail du sol améliore temporairement la capacité d'infiltration du sol, et l'enracinement profond mais après quelques averses (P = 60 à 120 mm), le sol nu s'encroûte et le ruissellement se développe de même que l'érosion. On tend aujourd'hui à réduire le travail du sol à la ligne de plantation et de laisser couvert le reste de la surface cultivée : la faune qui vit de la litière va assurer une bonne macroporosité. L'apport de MO est essentiel pour structurer le sol et maintenir une bonne agrégation, mais le problème est de développer des systèmes de production qui maintiennent le sol couvert durant les pluies les plus importantes. Malheureusement, on ne dispose jamais de MO en masse et qualité suffisantes. Dans certains cas, il est possible d'améliorer la texture de l'horizon superficiel en labourant profond et en remontant des horizons limono-argileux ou en rapportant des sédiments fins déposés en bas de pente ou dans les petits barrages collinaires.

**Réduire le pourcentage et la longueur de pente** : pour ralentir le ruissellement et capter les terres en suspension. Les talus, haies, cordons de pierres sont plus efficaces que les fossés car ils réduisent à la fois la longueur et le pourcentage de pente tout en transformant le versant en une série de bandes concaves.

**Améliorer la rugosité de la surface du sol** : sur les pentes < 15 %, l'orientation suivant les courbes de niveau du labour et du billonnage peut stocker l'eau des premières averses, mais après 30 à 120 mm de pluie, les rugosités sont décapées, les croûtes de battance s'étendent et le ruissellement se développe. On peut voir dans l'encadré 1 comment les sociétés paysannes adaptent l'orientation des billons en montagne en fonction des risques climatiques (ROOSE, 1994). Par contre, la rugosité des résidus de cultures, des adventices séchant en surface et le paillage sont plus efficaces et durables pendant plusieurs mois voir plusieurs saisons culturales (KHAMSOUK et ROOSE, 2003). Dans la réalité, c'est la combinaison des facteurs qui parvient à réduire la nocivité de l'énergie des pluies sur des cultures intensives.

Encadré 1

Orientation des billons en fonction de la pente et des conditions climatiques (d'après ROOSE, 1994).

D'après le modèle USLE (WISCHMEIER et SMITH, 1960, 1978)

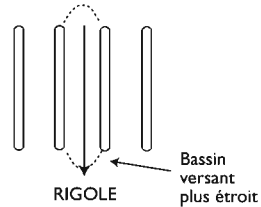
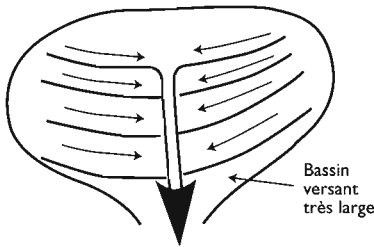
**Sur pente faible :**

- si billonnage cloisonné.....P = 0,1
- si billonnage en courbe de niveau.....p < 2 %.....P = 0,2
- < 8 %.....P = 0,3
- < 16 %.....P = 0,6
- < 25 %.....P = 0,9

**Sur pentes fortes (> 25 %)**, les effets de la rugosité/billonnage du sol sur le ruissellement diminuent fortement car la capacité de stockage de l'eau diminue avec la pente.

Par contre, les risques de débordement et de glissement de terrain augmentent.

- Lors des pluies faibles, l'érosion sera plus faible si le billonnage suit les courbes de niveau.
- Mais lors des fortes averses, le ruissellement finit par déborder et créer des brèches par où vont s'écouler toutes les eaux retenues derrière les billons : ces brèches peuvent se transformer en ravine plus difficile à gérer que les petites rigoles qui drainent les sillons orientés dans le sens de la pente (bassin drainant plus petit).



**Au Pérou**

À des altitudes de 1 500 à 4 000 m, les paysans tentent d'adapter les façons culturales aux conditions climatiques locales saisonnières.

Si la saison des pluies est :

- tardive, le billonnage est partiel

- très humide, les billons seront construits parallèlement à la pente,



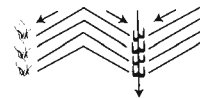
- très sèche ou tardive, ils seront perpendiculaires,



- incertaine, ils seront travaillés en patchwork,



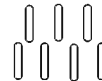
Si la pente est très forte et les sols pauvres, ils seront travaillés en chevrons.



**Au Cameroun**

En pays bamiléké vers 1 000 m d'altitude on peut observer :

- sur pente faible, de gros billons en courbe de niveau,
- sur pente forte, de gros billons courts dans le sens de la pente en quinconce.



Leur efficacité dépend du couvert végétal, des cultures associées et des herbes sarclées disposées dans les sillons.

En conclusion, il est délicat de conseiller l'orientation des billons :

- sur faible pente, le billonnage isohypse cloisonné est très efficace,
- sur forte pente, s'il y a des risques de glissement, on préfère des billons obliques ou des billons courts en quinconce bien couverts dans le sens de la pente.

# L'érosion linéaire en rigoles et ravines

## Les causes et les processus

Lorsque les pluies sont abondantes et la pente forte ou longue, le ruissellement en nappe se hiérarchise, se concentre en filets entre les touffes végétales, prend de la vitesse et développe une énergie propre capable de creuser des griffes profondes de quelques centimètres ou des rigoles de 10 à 50 cm de profondeur à la surface du sol, avec des zones d'érosion et des zones de dépôts des particules les plus grossières. Ce sont les forces de cisaillement de l'eau chargée de sables et graviers qui arrachent des agrégats, des mottes et des cailloux au fond et sur les flancs des rigoles. La résistance d'un profil de sol au ruissellement sera donc différente de « l'érodibilité » d'un sol à la battance des gouttes de pluie.

La naissance du ruissellement peut s'expliquer par trois théories (fig. 8).

*Théorie de Horton sur l'intensité des pluies.* Le ruissellement naît quand l'intensité de la pluie dépasse celle de la capacité d'infiltration des horizons superficiels du sol. Comme la capacité d'infiltration du sol décroît au cours des pluies, à mesure que la porosité de surface se sature ou se referme (croûte de battance), il arrive un moment où l'intensité de la pluie dépasse celle de l'infiltration (c'est le temps d'imbibition) : l'excédent s'accumule et circule en filets qui acquièrent une énergie capable d'entailler le sol et de charrier des particules grossières telles que des sables et des graviers. Cependant les hydrologues ont montré qu'il est rare d'obtenir une bonne corrélation entre le volume ruisselé dans un bassin versant et l'intensité des pluies. On a donc cherché une autre explication...

*Théorie de la saturation du sol.* Le ruissellement peut naître lors de pluies peu intenses mais suffisamment longues pour saturer les horizons superficiels du sol. Au cours d'une simulation de pluies de longue durée, il advient que le ruissellement se stabilise après quelques dizaines de minutes puis augmente à nouveau jusqu'à atteindre un nouveau plateau d'infiltration stabilisée très faible : c'est le cas des pluies de plus de 100 mm sur un horizon labouré sur une semelle de labour. Le premier plateau correspond à la capacité d'infiltration de la pellicule de battance de la surface du sol et le second à la très faible capacité d'infiltration de la semelle de labour, une fois l'horizon labouré saturé. Toute goutte qui tombe sur ce milieu saturé ruisselle quelle que soit l'intensité de la pluie.

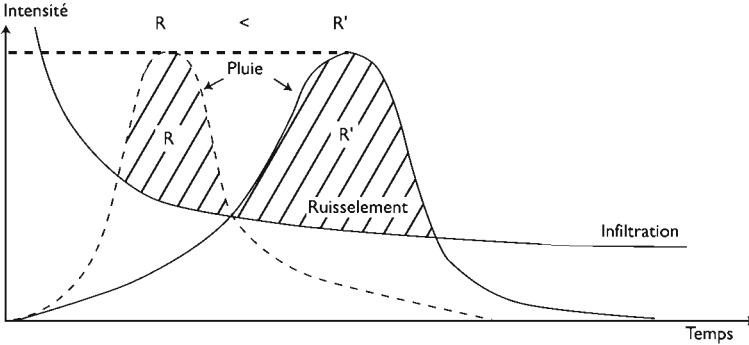
*Théorie de la contribution partielle de la surface.* Dans la nature, le ruissellement ne se développe pas sur toute la surface d'une parcelle ou d'un bassin mais seulement sur une partie, par exemple sur des surfaces nues, tassées, fermées par une croûte de battance, ou au fond d'une vallée où la nappe phréatique, nourrie par tout le bassin, va saturer une zone marécageuse (COSANDEY et ROBINSON, 2000).

En fonction de l'origine du ruissellement, la lutte antiérosive devra s'organiser différemment.

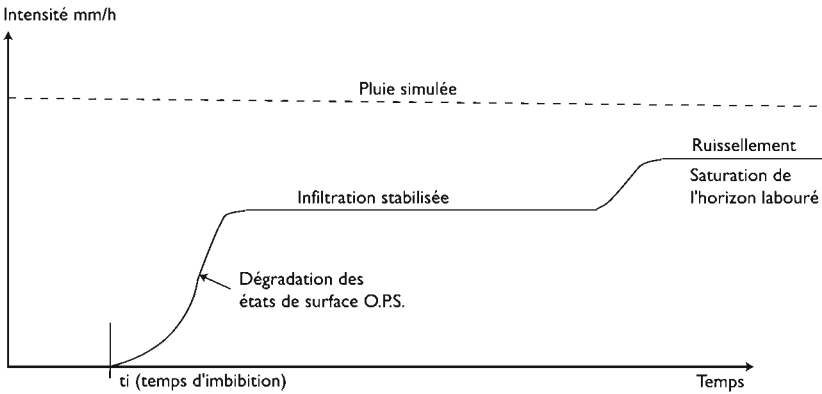
Elle devra veiller à protéger la surface du sol (paillis, plantes de couverture, mulch de cailloux) si le ruissellement se développe suite à la formation d'une

pellicule de battance, ou bien améliorer le drainage si les horizons profonds sont saturés. Dès lors on peut comprendre les nombreux échecs de LAE si on se contente d'appliquer partout les mêmes recettes de lutte antiérosive.

**Si intensité pluie > infiltration (Horton)**



**Si la porosité du sol est saturée**



**Contribution localisée du ruissellement**

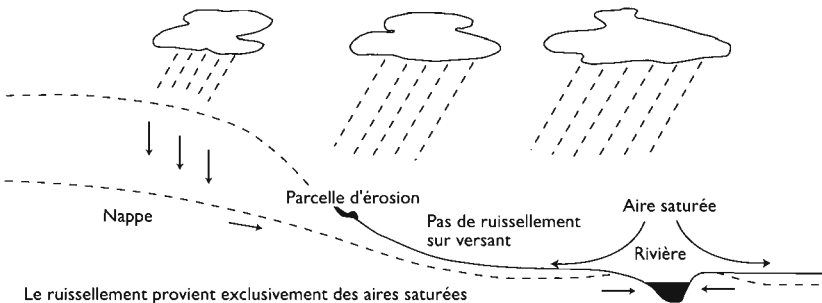


Fig. 8  
Trois théories expliquant la naissance du ruissellement.

## Les formes d'érosion linéaires et les indicateurs

### *Les griffes et rigoles*

L'érosion linéaire dépend donc du volume ruisselé et de son énergie. Celle-ci décape des griffes (profondeur de quelques centimètres) ou des rigoles (profondeur de 5 à 30 cm) à parois inclinées ou sub-verticales dans la partie la plus meuble du profil pédologique puis s'étale lorsque la rigole atteint un horizon plus cohérent (semelle de labour, horizon plus argileux, enrichi en fer ou silice).

On parle de « nappe ravinante » lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm de profondeur mais que la largeur atteint plusieurs mètres.

Dès que la vitesse du ruissellement diminue (diminution de la pente, augmentation de la rugosité de la surface, paillage, litières, touffes d'herbes, racines traçantes), ces rigoles superficielles s'estompent en abandonnant un mince cône de déjection.

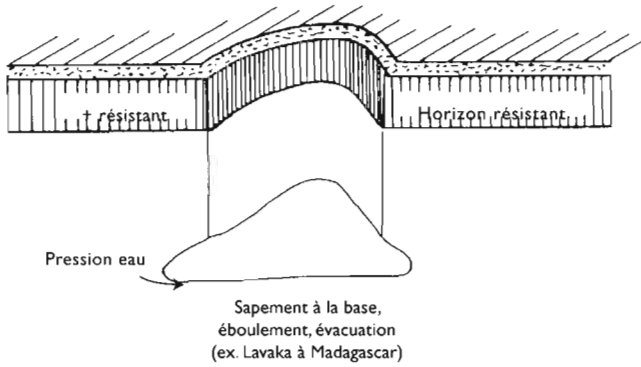
### *Les ravines et le ravinement généralisé*

On parle de ravine lorsque le creux dépasse 50 cm de profondeur et ne peut plus être effacé par les techniques culturales normales. On peut distinguer en pratique des petites ravines dont le lit est encombré de végétation herbacée et arbuscive et qu'on pourra fixer rapidement par des méthodes biologiques (petits seuils en grillage et plantations d'herbes au centre et d'arbres au pied des berges). Les ravines moyennes taillent la couverture pédologique jusqu'à la roche altérée de telle sorte qu'il faut d'abord fixer le fond des ravines et y accumuler 0,5 à 1 m de sédiments pour les végétaliser. Par contre, dans les grandes ravines torrentielles, qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central est tapissé de blocs rocheux, témoins d'un charriage de pierres important qui empêchent la fixation de toute végétation. Ces fonds mobiles devront être fixés par des seuils bétonnés et des épis en gabion (LILIN et KOOHAFKAN, 1987 ; MURA 1990).

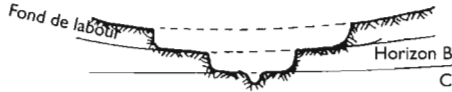
Il est intéressant de noter la forme de ces ravines (fig 9). Certaines ont des berges en V à pente constante jusqu'au fond : c'est le cas sur des matériaux tendres et homogènes comme les marnes, argilites, schistes tendres, grès tendre. D'autres ont des berges verticales jusqu'au fond car elles traversent des couches plus cohérentes (horizon B enrichi en argile de lessivage) au-dessus qu'en dessous : c'est le cas des « lavaka » fréquentes à Madagascar, qui évoluent par effondrement des flancs des ravines sous la pression de la nappe phréatique. Enfin, dans certains milieux semi-arides, où on trouve fréquemment des argiles gonflantes (vertisols, marnes gypseuses), des ravines en tunnel progressent par effondrement à partir des cavités érodées par les eaux de drainage circulant rapidement dans les fissures du sol et les poches de dissolution du gypse.

Sur les versants des collines, ces ravines sont hiérarchisées et leur bassin versant est bien défini. Leur rôle est d'évacuer rapidement les excès d'eau de ruissellement : si on tente de les reboucher, un autre drain va devoir se former sur la trace de l'ancienne ravine ou tout à côté. Il faut donc d'abord stabiliser la ravine, réduire le ruissellement de son bassin versant, avant de réduire le volume de la ravine.

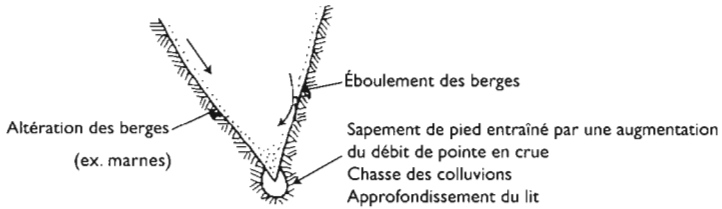
**Sur matériau hétérogène ravine en U**



**En grande culture**



**Sur matériau homogène : flancs de ravine en V**



**Sur argiles gonflantes, gypse et matières solubles : ravine en tunnel**

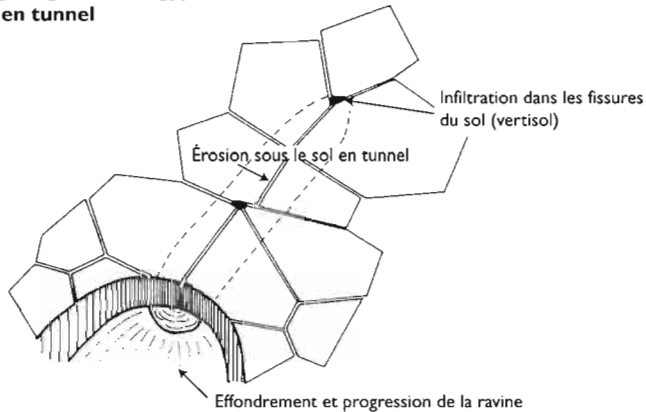


Fig. 9

Typologie des ravines : ravines en U (lavaka), en V, en tunnel (d'après ROOSE, 1994).



La perte en terre d'une zone creusée de rigoles atteint plusieurs dizaines de t/ha/an et l'érosion des ravines 100 à > 300 t/ha/an : la présence de ces indicateurs montre une nette augmentation des risques de ruissellement et d'érosion.

Le stade ultime de l'érosion linéaire est communément appelé « *badland* » (= mauvaise terre, ce qui n'est pas très précis) ou plus scientifiquement « ravinement généralisé » quand toute la surface initiale de la colline a été décapée. Cette forme est fréquente sur roches marneuses après défrichement surtout si elles sont riches en gypse et autres sels solubles : tous les processus d'érosion y sont présents mais le ravinement domine largement.

### Les effets de l'érosion linéaire

L'érosion en rigole décape une tranche de sol de façon non sélective. Quand le labour efface ces rigoles il étale sur toute la surface ce décapage linéaire non sélectif et accélère la fonte de l'horizon humifère. La charrue va gratter dans l'horizon sous-jacent et remonter des matériaux moins riches en MO, mais souvent plus riches en argile ou en cailloux. Il reste une ondulation de la surface qui va servir de drain pour les pluies suivantes.

Il arrive que les rigoles évoluent en ravines : il n'est généralement plus possible de les effacer par de simples techniques culturales sans laisser une ondulation du versant où va s'écouler préférentiellement le ruissellement issu des pistes, des parcours ou des champs en amont. La surface ravinée constitue une perte de surface cultivable (SAU) qui va s'étendre latéralement : en outre, les ravines gênent la circulation du bétail, des véhicules et des outils et fragmentent la surface à cultiver. En aval, la ravine dépose une masse de matériaux non sélectionnés souvent sableux ou caillouteux qui dégradent les vallées. Les grandes ravines rabattent aussi la nappe phréatique et dessèchent les bas-fonds. L'érosion linéaire est donc particulièrement nocive pour le développement d'une agriculture intensive durable.

### Les facteurs modifiant le ravinement

L'érosion linéaire dépend de la masse de ruissellement (M) et du carré de sa vitesse ( $V^2$ ) au niveau des parcelles et de la masse, de la force d'attraction (G) et de la différence d'altitude depuis le haut jusqu'au bas du bassin versant (H) ; énergie linéaire =  $1/2 M \times V^2$  à la parcelle ou =  $1/2 M \times G \times H$ , sur bassin versant.

Le volume du ruissellement dépend de l'intensité et du volume des pluies, de l'humidité du sol avant la pluie, de la surface du bassin drainé par une rigole ou ravine, de l'état (fermé, ouvert, tassé, couvert) de la surface du sol, des activités de la faune, de la pente et de la rugosité du sol et du coefficient de ruissellement de chaque zone de ce bassin.

La vitesse du ruissellement dépend de la pente et de la rugosité du canal, de l'épaisseur de la lame ruisselée et de la hauteur de chute de l'eau dans la ravine. D'après M. STOCKING (1980), la vitesse d'avancement des ravines sur des sols alluviaux salifères fragiles homogènes du Zimbabwe dépend du volume des pluies (P en mm), de la surface du bassin et de la hauteur de chute (H) :

$$\text{érosion par ravines} = 6,87 \times 10^{-3} P^{1,34} \times S^1 \times H^{0,52}$$

On ne peut modifier l'intensité des pluies, mais on connaît les versants qui reçoivent les vents humides et les adrets généralement plus secs et moins bien protégés par la végétation.

### *Le couvert végétal*

Le couvert végétal protège la surface de la battance, prolonge ainsi la période de forte infiltration et réduit le volume ruisselé. De même, la litière entretient les activités perforatrices de la faune et absorbe une grosse partie de l'énergie du ruissellement. Enfin, les racines superficielles, les adventices et les tiges des graminées augmentent la rugosité et ralentissent le flux. La végétation et la litière peuvent aussi absorber une partie des pluies (1 à 10 min), mais ce n'est qu'une faible part des grosses averses qui vont provoquer un fort ruissellement et les transports de terre érodée. De plus, dans les ravines, les touffes d'herbes ou arbustes peuvent capter une bonne part des sédiments grossiers et ralentir le ravinement (REY, 2002). Le parcours et le pâturage des champs entraînent un tassement des premiers centimètres du sol et une augmentation sensible du ruissellement (SABIR *et al.*, 1996). Les jachères, le matorral pâturé et les parcours sont généralement une source de ruissellement abondant et de ravines dans les champs situés en aval (LAOUINA *et al.*, 2008).

### *Le sol*

Le sol intervient à différents niveaux. L'humidité du sol augmente le ruissellement et réduit sa résistance à l'abrasion. La rugosité de sa surface, fonction des techniques culturales, réduit la vitesse du ruissellement et augmente le volume d'eau stocké avant le début du ruissellement. Le billonnage cloisonné et le maintien en surface d'un mulch de résidus de cultures ou les adventices peuvent aussi réduire fortement le ruissellement issu d'un champ. La texture du sol peut intervenir. On pense généralement que les sols sableux sont plus perméables que les sols argilo-limoneux, sauf si ceux-ci sont bien structurés. La stabilité de la structure a une incidence sur la résistance à la battance, donc sur la fermeture de la porosité de la surface et sur la pluie d'imbibition. Les cailloux peuvent avoir deux influences opposées. Les cailloux posés sur des surfaces ouvertes vont les protéger de la battance et prolonger l'infiltration. Si, par contre, les cailloux sont inclus dans la masse ou dans la croûte de surface, ils vont augmenter le ruissellement (VALENTIN et FIGUEROA, 1987 ; POESEN, 1989 ; ROOSE, 1994). Si les sols sont tassés, ils seront moins perméables mais plus résistants à l'énergie des pluies et du ruissellement. Le pâturage des jachères peut donc tasser le sol qui, une fois labouré, fournira des mottes plus denses et plus résistantes.

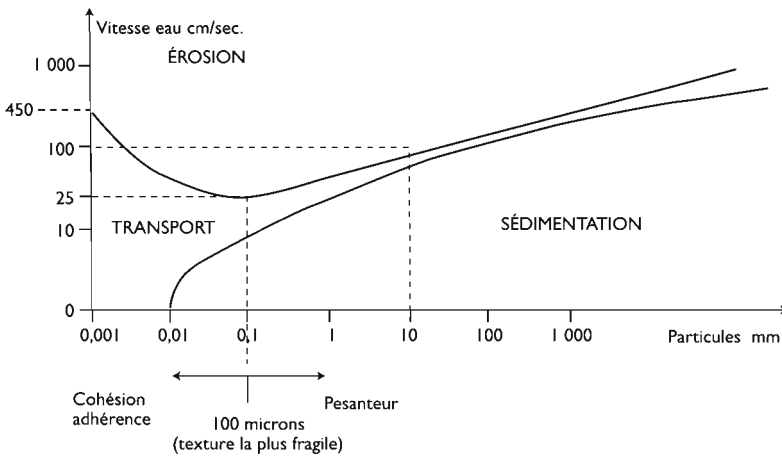
### *La pente*

Dans le domaine des pentes faibles (< 2%), l'inclinaison des pentes augmente le volume ruisselé, mais sur forte pente on observe un meilleur drainage interne et la formation plus lente des pellicules de battance, lesquelles sont détruites au fur et à mesure de leur formation par l'énergie du ruissellement (HEUSCH, 1970 ; ROOSE, 1973, 1977, 1994 ; VALENTIN *et al.* ; LAOS, 2004).

La longueur de pente devrait aussi intervenir car le refus à l'infiltration devrait s'accumuler tout au long du versant. Cependant, il a été constaté dans de nombreux cas qu'il y a interaction entre l'effet de la longueur de la pente, la rugosité et la porosité des sols le long du versant (WISCHMEIER, 1966 ; ROOSE, 1994). Pour réduire l'érosion en ravine, on interviendra sur la pente du canal en divisant celui-ci en secteurs à pente faible (pente de compensation de 6 à 25 % en fonction de la roche locale) et secteurs à pente raide renforcée par des seuils en pierres, grillages, touffes d'herbes ou d'arbustes.

### L'érodibilité des terres

F. HJULSTRÖM (1935) a étudié l'érodibilité de matériaux terreux de taille croissante en fonction de la vitesse des écoulements dans un canal. Il a montré que l'érosion démarre pour une vitesse du fluide de 25 cm/seconde lorsque le matériau des berges est le plus sensible (100 microns = sables fins plus lourds que les silts, matériaux les plus sensibles à l'érosion en nappe) : pour déplacer les sables plus lourds ou les argiles plus cohérentes, il faut des vitesses supérieures.



Ce diagramme de Hulström comporte plusieurs informations.

1. Les matériaux les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement ont une texture voisine des sables fins (100  $\mu$ ). Les argiles sont plus cohérentes et les matériaux plus grossiers sont plus lourds et exigent une vitesse supérieure de l'eau pour être arrachés. Noter que pour le modèle USLE de Wischmeier et al., 1971, les sols les plus érodibles par la battance des pluies sont riches en limons et sables fins.
2. Tant que les écoulements s'effectuent à une vitesse faible (< 25 cm/seconde), ils ne peuvent éroder les particules du sol. Pour éviter le ravinement, il faut donc étaler et ralentir le ruissellement. D'où la justification de la pratique de la dissipation de l'énergie du ruissellement.
3. Le transport des argiles et limons s'effectue facilement, même à faible vitesse. Mais pour les matériaux plus grossiers que les limons, on passe très vite de la zone d'érosion à la zone de sédimentation. Or les sols tropicaux ont généralement un horizon sableux en surface. On comprend donc pourquoi les fossés d'évacuation des eaux de ruissellement sont soit érodés s'ils sont trop étroits ou trop pentus, soit ensablés par des matériaux qui n'arrivent pas à circuler, par exemple en fin d'averse. C'est une des raisons pour lesquelles les fossés de diversion ne donnent pas satisfaction dans les pays tropicaux. En absence d'entretien, le ruissellement déborde et provoque des ravinements qui ruinent les versants en cinq à dix ans.

Fig. 10

Diagramme de Hjulström (1935). Effets de la texture du sol et de la vitesse de l'eau sur l'érosion, le transport et la sédimentation dans un canal.

Lorsque la vitesse du ruissellement est inférieure à 25 cm/s, on peut observer le dépôt des sables grossiers et des graviers. Les berges constituées d'argile et de cailloux sont bien moins fragiles que les berges sableuses. Le ruissellement en nappe, très sensible à la rugosité de la surface du sol, dépose des nappes de sable/graviers dès qu'il est freiné par les plantes, les cailloux ou les mottes. Dès que la vitesse du ruissellement augmente, l'érosion linéaire n'est plus sélective et décape tout le sol y compris des cailloux dont la taille dépend de sa vitesse, donc de la pente du sol. Hjulström a aussi montré que le domaine de transport des sables et graviers est très étroit, ce qui veut dire que dès que le ruissellement diminue, les sables et graviers se déposent et encombrant les lits des oueds et vallées sèches.

### **La lutte contre l'érosion linéaire**

Pour lutter contre le ravinement, il faut réduire la vitesse du ruissellement et progressivement son volume.

#### *Aux champs*

Il est possible de réduire le ruissellement et de freiner l'érosion par l'adaptation des techniques culturales et l'extension du couvert végétal.

Sur des sols tassés, le labour profond permet un meilleur enracinement, un meilleur stockage de l'eau et donc un meilleur développement du couvert végétal, lequel entraîne à son tour une réduction du ruissellement et de l'érosion. Si le sol est en bon état physique, une autre approche est possible qui consiste au contraire à réduire le travail du sol au minimum (dent sous la ligne de plantation), à laisser le sol toujours couvert (légumineuse de couverture, résidus de culture, paillage, gestion sur place des adventices) et à favoriser les activités de la faune perforatrice pour améliorer l'infiltration. Sur les faibles pentes, le billonnage isohypse ou cloisonné peut aussi améliorer l'infiltration. É. ROOSE (2008) a montré que les cordons de pierres, les haies vives, les terrasses progressives ou radicales peuvent aussi réduire le ruissellement et l'érosion de 30 à 50 %.

#### *La fixation biologique des petites ravines (LILIN et KOOHAFKAN, 1987)*

Il suffit souvent de ne pas cultiver ces petites surfaces mais de maintenir ces terrains tassés sous prairie, d'y dresser des cordons de pierres et des haies vives assez solides pour réduire la vitesse du ruissellement. Dans les zones périurbaines intensément cultivées, on peut creuser des étangs d'orage ou de petits barrages collinaires pour écrêter les crues, intercepter les sédiments boueux : cependant cette technique est coûteuse car il faut régulièrement curer ces petits réservoirs.

Si le ravinement n'a pas décapé toute la terre fine jusqu'à la roche, et qu'une partie de la végétation, bien que dégradée, tient encore, on peut tenter de restaurer la végétation naturelle et de l'enrichir par des espèces vigoureuses et utiles (canne de Provence, bambous, canne à sucre, herbes fourragères, laurier-rose, carex, opuntia, etc.) ou des arbres fruitiers (oliviers, amandiers, caroubiers, fruitiers derrière de petits seuils ou cuvettes protégées par des pierres), en choisissant les espèces présentes sur le site ou adaptées au microclimat.

### *La stabilisation des ravines moyennes*

Si le fond de la ravine moyenne est presque complètement décapé et la végétation arrachée, il est indispensable dans un premier temps de fixer le fond de ravine par une série de seuils qui vont ralentir le ruissellement et capter une partie des sédiments. Au bout de quelques précipitations, ces seuils seront remplis de sédiments ; il faudra alors, soit construire une seconde série de seuils en amont des premiers pour relever le fond de ravine et mieux fixer les berges, soit végétaliser ces sédiments (planter des arbres sur les berges et des herbacées souples au centre de la ravine) pour laisser passer le flux d'eau tout en protégeant les dépôts. Il faut éviter de planter des arbres isolés au centre du flux lequel tourbillonne autour de cet obstacle et le déterre. Comme l'État n'a pas les moyens humains et financiers d'entretenir les milliers de kilomètres de ravines petites et moyennes, il faut envisager avec les paysans riverains d'y planter des ensembles de plantes utiles (fruits, fourrages, bois de feu ou de construction) et de conclure des contrats leur permettant d'exploiter les fourrages et fruits divers sur ces terres, à condition d'entretenir les seuils et de tenir le bétail à l'écart de l'aménagement (ROOSE, 1994).

### *La restauration des grosses ravines torrentielles*

Lorsque le fond des grosses ravines est couvert de roches et de grosses pierres, il est évident qu'aucune plante ne peut résister au débit de pointe et aux chocs des galets en migration. Il faut impérativement fixer le fond avec des seuils bétonnés ou des gabions avec des grosses pierres maçonnées. Ces aménagements très coûteux de génie civil (100 € le m<sup>3</sup> de gabion) dépassent les possibilités techniques des paysans : ils devraient faire appel à des services techniques spécialisés de l'État.

L'originalité de ces techniques de lutte c'est, non seulement de bloquer la progression de l'érosion en ravine, mais de stocker quelques dizaines de mètres cubes de sédiments derrière chaque seuil et de valoriser l'eau stockée dans les macropores des sédiments en produisant en saison sèche du fourrage vert et des arbres fruitiers qui peuvent inciter les paysans à s'investir dans la protection des ravines de montagne. En Algérie, ces ravines productives ont été appelées « oasis linéaires ».

## L'érosion en masse

Alors que l'érosion en nappe s'attaque à la surface du sol, le ravinement aux lignes de drainage du versant, les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique et des formations géologiques tendres. Nous ne présenterons ici que les principes généraux de prévention et de lutte contre les mouvements de masse utilisables par les paysans. Seul l'État dispose des moyens techniques, humains, financiers et légaux, pour maîtriser

les problèmes de glissements de terrain, souvent catastrophiques et pour imposer les restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de glissement de terrain. Consulter les ouvrages du Cemagref (1984-1985) et de Heusch (1988) pour les informations techniques plus précises sur le génie civil à mettre en œuvre.

## **Érosion aratoire lente**

### *Cause et processus*

Dès qu'un outil aratoire découpe une masse de sol et la déplace sur le champ, il y a érosion. Par gravité et par simple poussée des instruments aratoires, ce type d'érosion décape les horizons superficiels du sol des hauts de pente et des zones convexes des versants, pousse ces masses de terre arable vers le bas de la topographie où elles s'accumulent, soit en talus en bordure des parcelles, soit en colluvions concaves de texture voisine des horizons d'origine : il n'y a donc pas d'érosion sélective. L'importance de l'érosion aratoire dépend du type d'outil, de la profondeur du travail, de la forme et de l'inclinaison de la pente, de la fréquence du travail et de son orientation. Chaque labour à la charrue déplace environ 10 t/ha et chaque sarclage mécanique environ 1 t/ha.

En Équateur, G. DE NONI et M. VIENNOT (1991) ont été amenés à remonter une murette de 1,3 m en 24 mois (soit 40 t/ha/an). En Côte d'Ivoire, Rwanda et Burundi, É. ROOSE a observé la formation de talus de 1 m en 4 à 5 ans, que ce soit en culture motorisée ou manuelle (houe) (ROOSE et BERTRAND, 1971). En Algérie, après 30 années de culture d'un verger sur une pente de 35 % près de Médéa, les collets des arbres se retrouvent 30 cm plus haut que la surface du champ. Même si on additionnait l'érosion sur un sol nu pendant 30 ans, on ne dépasserait pas 3 cm, tandis que la reptation de la couverture pédologique par le travail du sol (2 labours et deux pulvérisations/an) atteindrait 27 cm en 30 ans, soit 13,5 t/ha/an.

### *Les indicateurs et les effets de l'érosion aratoire*

Parmi les indicateurs, on note :

- les taches aux couleurs claires et des horizons humifères moins épais en haut de versant ; ceux-ci peuvent s'expliquer par l'érosion en nappe, l'érosion aratoire et une altération moins rapide, le terrain étant plus sec, mieux drainé ;
- l'empâtement du contact versant/plaine ;
- la formation et la croissance des talus dans les paysages cultivés ;
- le comblement de certaines ravines sur versant (REVEL, 1989) ;
- le billonnage et la formation de planches sur les versants ou de terrasses au bulldozer ;
- les filons de quartz sapés à hauteur du fond de labour ;
- les cailloux mélangés à l'horizon humifère en bas de pente.

On a souvent confondu les effets de l'érosion en nappe et de l'érosion aratoire, tous deux se traduisant par le décapage de l'horizon humifère et l'apparition de taches plus claires sur les versants (WASSMER, 1981 ; NYAMULINDA, 1989).

Comme toute érosion en masse, l'érosion aratoire n'est pas sélective, ni à l'arrachement, ni au dépôt dans les talus ou colluvions de bas de versant. Par contre, elle est responsable du glissement discret mais très efficace de la couche labourée du sommet des versants et des parcelles vers la limite inférieure du champ (talus ou bourrelet) ou au contact concave colluvial versant/vallée. Il participe activement à l'évolution de la pente des terrasses progressives.

### *Les facteurs de l'érosion aratoire*

L'intensité du déplacement de terre dépend :

- De l'intensité du travail du sol.
- Du type d'outil : la charrue à soc déplace plus de terre que le chisel (Revel *et al.*, 1989) et plus que la charrue à disques, ou que la herse. L'araire tracté lentement par les animaux éclate la surface du sol plus qu'elle ne la retourne : elle déplace moins la terre que la houe ou la charrue. Cependant, sur forte pente, l'araire a tendance à glisser vers le bas des champs en entraînant les mottes soulevées.
- De la fréquence des passages : en zone méditerranéenne semi-humide, on observe souvent deux labours, un hersage et deux sarclages. En zone semi-aride, il y a un labour souvent rapide et superficiel (disques) suivi d'un hersage. Là où on dispose d'un tracteur, on gratte rapidement la croûte superficielle. Plus la vitesse de circulation est rapide et plus les transports de terre sont importants.
- De l'orientation du travail : le travail du sol peut être effectué selon les courbes de niveau, avec le versoir orienté vers l'aval (on repousse la terre vers le bas, mais on améliore l'infiltration) ou vers l'amont (plus difficile à réaliser). Le plus souvent, sur les pentes de plus de 15 %, le tracteur est obligé de labourer du haut vers le bas du champ. Par contre, dans les pays tropicaux, les travaux manuels s'effectuent à la houe du bas vers le haut du champ. Il est très rare que la terre soit remontée par les outils : par contre, dans les vignobles et sous certaines conditions, le paysan remonte la terre déposée dans des mares au pied du versant. J.-C. REVEL *et al.* (1989) ont constaté que l'aller et le retour des outils peut réduire considérablement la migration mécanique des terres labourées.
- De l'inclinaison de la pente : plus la pente est forte, et plus les mottes déplacées par la houe ou le tracteur roulent loin vers le bas de la pente. En montagne, les hauts de pente, les ruptures de pente et les sommets des collines sont souvent décapés. Le décapage s'accélère sur les versants convexes et ralentit sur les bas de pentes concaves où s'amassent des colluvions : celles-ci seront transformées progressivement en terrasses irriguées.

### **Les glissements rapides en planches ou en coups de cuillère**

#### *Causes et processus*

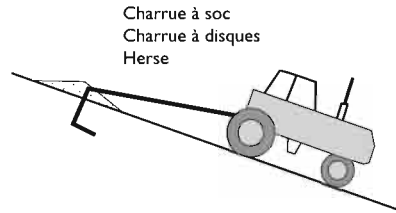
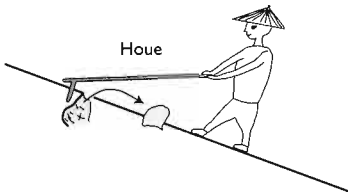
Les glissements de terrain en planche sont des décollements brutaux d'une couche de sol perméable plus ou moins épaisse, saturée d'eau, celle-ci exerçant une pression hydrostatique sur un horizon plus compact, souvent la roche altérée ou un niveau de mica, servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur pentes fortes dans les zones tropicales humides sur les schistes dont le

pendage est parallèle à la topographie, sur des cendres volcaniques couvrant des granites ou des roches sédimentaires (marnes ou argilites) ou métamorphiques (gneiss et surtout schistes micacés) en voie d'altération. Ce phénomène est très brutal.

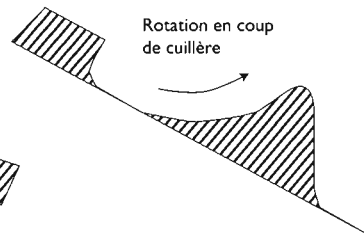
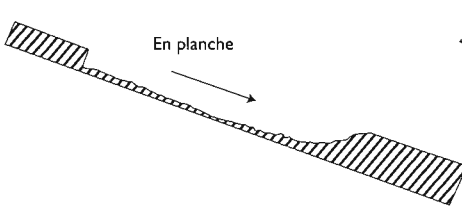
La cause des mouvements de masse rotationnels est à rechercher dans le déséquilibre entre d'une part, la masse de la couverture pédologique, l'eau qui s'y trouve stockée et les végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur le socle de la roche altérée en pente sur lequel ils reposent. La pente limite où se développent ces glissements rapides est de 40 à 60 %. Ce déséquilibre peut se manifester progressivement sur un ou plusieurs plans de glissement suite à l'humectation de ce plan, soit par dépassement du point d'élasticité de la couverture pédologique (déformation avec rupture), soit par dépassement du point de liquidité (fig. 11).

### Érosion aratoire

Descente progressive des terres par des outils de travail du sol



### Glissements de terrain



### Coulées boueuses

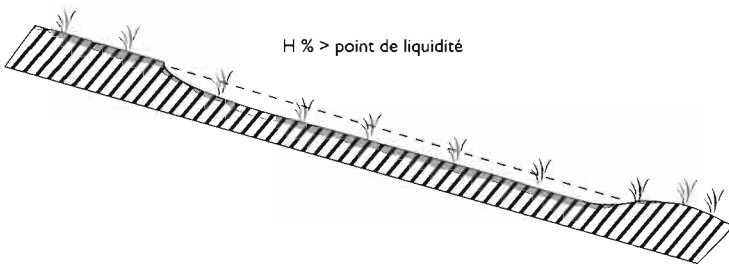


Fig. 11

Diversité des formes d'érosion en masse (d'après ROOSE, 1994).



Ce déséquilibre est généralement brutal et associé à des secousses sismiques ou à des averses orageuses abondantes sur des sols plus profonds que pour les mouvements en planches (TEMPLE et RAPP, 1972). La circulation rapide de l'eau dans des fissures ou des mégapores jusqu'à la roche pourrie provoquerait une pression hydrostatique capable de repousser les horizons structurés du sol, de décoller celui-ci par rapport à un niveau fragilisé de la roche pourrie : la forte pente favoriserait alors le mouvement rotationnel.

L'homme peut accélérer la fréquence de ces mouvements en modifiant la géométrie externe du versant (terrassement, creusement d'un versant pour y installer une route ou des habitations, surcharge par des remblais instables, modification des écoulements naturels, érosion au pied d'un versant par une rivière dont le cours est dévié). La végétation intervient également : P. Temple et A. Rapp ont montré, en Tanzanie, que 47 % des glissements de terrain sont situés sur des champs cultivés (maïs + mil + haricots), 47 % sur les jachères et parcours, et moins de 1 % dans les zones forestières, pourtant très humides. Même les arbres isolés semblent avoir un effet puisque seules les pistes non plantées d'arbres montrent des traces de glissement de terrain : une simple rangée d'arbres suffirait pour éviter les mouvements de masse.

### Les indicateurs

Les glissements rotationnels laissent sur le versant des traces significatives :

- un décollement en amont de la couche perméable du sol, un déplacement sur un plan de glissement et le doublement de cette même couche à l'aval ;
- un décollement en amont plus profond pour le mouvement rotationnel que pour les mouvements de masse en planches ;
- un basculement du volume en mouvement qui aboutit à une contrepente en aval, bien souvent une zone humide (carex, roseaux) au contact avec le fond de la couverture pédologique d'où peut démarrer une ravine latérale ;
- une langue de terre en pente forte ;
- pas de sélectivité de l'érosion, ni au départ, ni à l'aval.

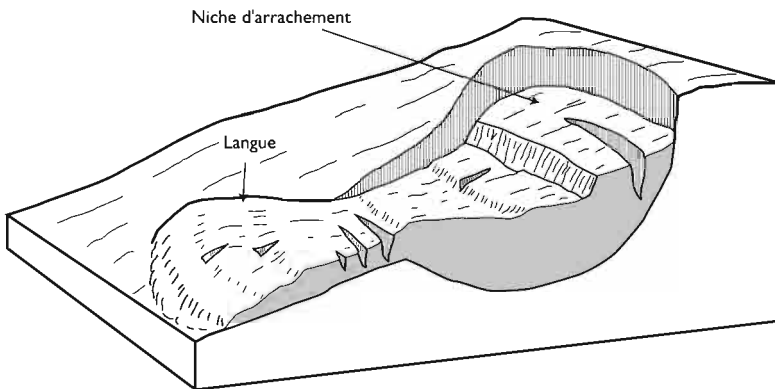


Fig. 12

Glissement rotationnel en coups de cuillère (d'après NEBOIT, 1991).

## Les coulées boueuses ou laves torrentielles

### *Cause et processus*

Les coulées boueuses sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité. Elles peuvent emporter des masses considérables de boue, de cailloux et de blocs de rochers de taille imposante ( $> 1 \text{ m}^3$ ).

Lorsqu'elles viennent de se produire, les coulées se présentent comme un canal terminé par une langue de boue et de matériaux non triés. Les matériaux fins peuvent être repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs rocheux de taille très hétérogène. D'après RAPP et TEMPLE (1972) en Tanzanie, ces coulées boueuses apparaissent souvent à la suite d'un glissement en planche ou dans une ravine lors d'une averse exceptionnelle dont le ruissellement va nettoyer les altérites accumulées en bas de pente depuis quelques années.

### *Les indicateurs*

Les coulées boueuses laissent sur le terroir des traces facilement identifiables :

- un évidement amont jusqu'au niveau imperméable, mais avec continuité de l'horizon de surface si celui-ci est protégé par un réseau dense de racines de graminées ;
- en aval une langue de terre boueuse bombée ;
- un tas de cailloux et blocs non tamisés en discordance d'avec les roches sous-jacentes.

## Les techniques de lutte contre les mouvements de masse

### *La lutte contre l'érosion aratoire*

On a souvent confondu les processus d'érosion en nappe avec l'érosion aratoire car les facteurs et les indicateurs se recourent. La lutte porte sur le travail du sol et quelques aménagements.

#### *Réduction du nombre de passages des outils et de l'importance du travail du sol.*

Depuis une vingtaine d'années en Amérique du Nord et du Sud se développent des techniques de culture conservatrice, réduisant le travail du sol au minimum (décompactage sans retourner la litière, réduction du nombre de passage), et même semis direct sous la litière : seule une dent ouvre la ligne de semis pour permettre d'injecter les engrais, les semences et les pesticides, tandis que la litière est foudroyée par un herbicide ou déchiquetée par un rouleau à couteaux : ces méthodes ont été testées avec des succès variables dans le Lauragais (Sud-Ouest de la France, ROOSE et CAVALIÉ, 1986), au Maroc (MRABET *et al.* 2004-6) et en Tunisie (RAUNET *et al.*, 2004) : si la stabilité des agrégats et l'infiltration de l'horizon superficiel augmentent, il n'en va pas forcément de même chaque année pour les rendements des cultures (DIALLO *et al.*, 2008). Au Mali et au Nord-Cameroun, sur des sols sableux, le ruissellement et l'érosion baissent systématiquement, mais les rendements de cotons en années sèches sont corrects (-10 à + 20 %) tandis que le maïs en année à événement pluvieux abondant en

juillet se comporte mal si le sol est tassé : le paysan perd 20 à 40 % du maïs les années très humides, s'il ne compense pas les engrais entraînés dans les eaux de drainage excédentaires.

*Réduction de l'énergie dépensée pour le travail du sol.* Il n'est pas toujours nécessaire de retourner le sol avec une charrue. Un simple éclatement de l'horizon humifère par les dents d'un chisel ou autre cultivateur aère le sol, augmente la macroporosité, la capacité de stockage en eau, l'enracinement et maintient en surface la matière organique et les résidus de cultures. À la limite, le travail est réduit à la ligne de semis tandis que 80 % de la surface du champ reste couverte par la litière et les résidus de culture. Un tel système réduit à néant les risques d'érosion aratoire en même temps que l'érosion en nappe.

*L'orientation du travail du sol.* Si la pente est inférieure à 14 %, il est possible de travailler le sol au tracteur suivant les courbes de niveau sans déplacer trop de terre à condition de passer les outils en aller et retour (REVEL *et al.*, 1989). Par contre, au-delà de 15 % de pente, les tracteurs risquent de verser et on est obligé de labourer dans le sens de la pente, mais on peut semer perpendiculairement ou développer des systèmes de cultures pérennes avec plantes de couverture ou du paillage.

*Construction de terrasses progressives entre des talus.* Sur des sols suffisamment profonds, on peut aussi aménager des talus protégés entre lesquels se développent des terrasses progressives moins pentues. Sur des pentes de plus de 40 %, E. Latrille (1975) a observé dans les Comores des cultures sur billons ou sur planches.

### *La lutte contre les mouvements de masse rapide*

Pour réduire le risque de ces mouvements de masse rapide, il est préconisé :

- d'évacuer le drainage au niveau du plan de glissement ;
- de détourner le drainage superficiel par un fossé ;
- et d'augmenter l'évaporation par l'implantation de jeunes arbres gérés en taillis, en particulier l'eucalyptus bien connu pour sa croissance rapide, son enracinement puissant et son évapotranspiration élevée. L'eucalyptus ne supportant pas le gel, il faut en haute montagne sélectionner des espèces arborées connues pour leur capacité à s'accrocher dans les sols peu profonds et les fissures de la roche (*Fraxinus, Alnus, Pinus*, etc.).

La lutte contre l'érosion en masse doit avant tout être préventive : plan d'occupation des sols interdisant toute construction et modification du versant, zone réservée à une forêt de protection gérée sous forme de taillis pour ne pas trop charger la couverture pédologique. Cependant, il n'est pas toujours possible d'écarter les cultures des zones montagneuses souvent plus peuplées que les plaines car le climat y est plus sain (pas de paludisme, ni de mouche tsé-tsé) et les terres mieux arrosées (comme en Éthiopie). Dans ces cas difficiles, la plantation de lignes d'eucalyptus ou d'un parc d'essences locales (oliviers par exemple) peut aider les paysans à réduire les risques de glissements de terrain.

La lutte contre les glissements de terrain est une affaire de spécialistes qui réclame de gros moyens pour évacuer les eaux de surface excédentaires, drainer

les plans de glissement et fixer la couverture de terre et de blocs rocheux. Ces investissements de l'État ne se justifient que pour protéger des aménagements vitaux : routes, villes, hôpitaux, barrages. Mais les paysans connaissent quelques recettes comme d'implanter des arbres, en particulier l'eucalyptus et des bambous, pour assécher l'assiette des talus et stabiliser les versants et les berges. En jouant sur le choix des espèces, on arrive à transformer ces paysages de montagne en bocages stables (comme en pays bamiléké dans les montagnes de l'Ouest camerounais).

## Étude critique de l'approche mécanique conventionnelle

De nombreuses avancées de la recherche ont montré que certaines techniques ne peuvent s'appliquer avec succès sur certains sols tropicaux et qu'il faut absolument tenir compte de leur acceptabilité par le monde rural si on espère une bonne durabilité des aménagements de LAE. L'échec des aménagements anti-érosifs peut provenir de deux causes principales :

- des erreurs techniques,
- un manque d'acceptabilité pour les « bénéficiaires », les sociétés paysannes, les éleveurs.

Différents facteurs permettent d'apprécier les problèmes de l'érosion.

### **Les pluies**

En région méditerranéenne de montagne, l'agressivité des pluies est plutôt modeste ( $Ram = 20$  à  $200$ ) : elles sont 5 fois moins énergétiques par millimètre que les pluies des régions tropicales. Mais les pluies de fréquence rare sont dangereuses. Il peut s'agir d'orages violents sur une surface limitée (par exemple sur les sommets de l'oued Ourika, Haut Atlas, en 1997), ou de pluies abondantes, peu intenses mais persistantes plusieurs jours au point de saturer le milieu sur de grandes surfaces et de provoquer des inondations catastrophiques (par exemple en Tunisie et sur le Rif, en 1969).

### **Les couverts végétaux**

Les forêts et le matorral sont en général des milieux protégeant bien le sol contre l'érosion en montagne. Mais dès que les animaux les parcourent, ils réduisent la surface couverte, créent des cheminements tassés et dénudés par les sabots qui vont drainer les eaux de ruissellement du versant et créer des ravines en aval sur les terres cultivées. Ce sont les plantes basses et les litières qui sont les plus efficaces pour intercepter l'énergie des pluies et du ruissellement. Enfin, plus les végétaux sont diversifiés et mieux ils réalisent une couverture efficace pour

absorber l'énergie du soleil et des pluies : au lieu des monocultures, il faut développer des associations de plantes différentes par leur structure aérienne, par leur réseau racinaire et par leurs besoins complémentaires (SABIR et ROOSE, 2004).

### Les sols

Hormis les sols sodiques, les sols des régions méditerranéennes sont classés parmi les sols très stables à moyennement stables et non parmi les sols les plus fragiles comme on l'a souvent enseigné. Si on constate que les problèmes d'érosion sont souvent graves en zone méditerranéenne, c'est que le volume et l'énergie des pluies de fréquence rare peuvent être importants et entraîner la dégradation de la végétation et les sols. On a aussi négligé trop longtemps l'importance des cailloux qui dissipent une bonne partie de l'énergie des pluies ainsi que du calcaire libre qui maintient les colloïdes bien agrégés. On a tendance à épierrer les sols pour protéger les outils de travail du sol et libérer la surface pour les plantations. Les paysans rangent les plus grosses pierres en tas, sur des cordons ou des murettes, en oubliant leur rôle de dissipation de l'énergie : par conséquent, l'épierrage augmente les risques d'érosion.

### Les pentes

Dans la limite du modèle de Wischmeier et Smith, SL varie de 0,1 à 20 sur des pentes de 1 à 25 %, pentes le plus souvent cultivées (voir p. 51). Pour les cultures sur des pentes plus fortes, fréquentes en montagne, le modèle a été extrapolé, mais il s'avère que dans bon nombre de cas l'érosion n'augmente plus de façon exponentielle car les sols sont moins épais, plus riches en argile et (ou) en morceaux de roches beaucoup plus résistantes à l'énergie des pluies. De même, le ruissellement est moins abondant sur les fortes pentes où le ruissellement griffe continuellement les croûtes en formation, que sur les glacis peu pentus mais où le ruissellement en nappe ayant du mal à tracter les sables, dépose un pavage de sables, limons et argiles blanchâtres.

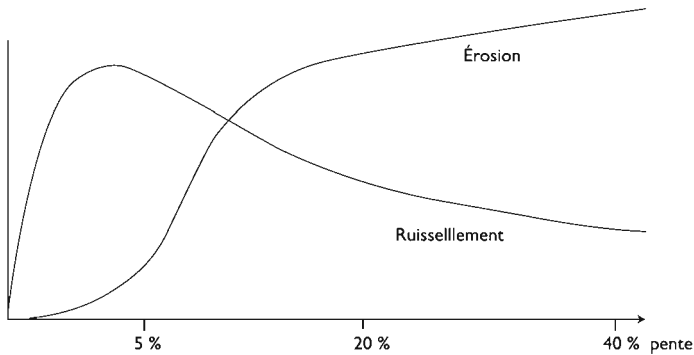


Fig. 13

Influence de la pente (%) sur le ruissellement et l'érosion en milieu méditerranéen (d'après Hudson, adapté par ROOSE, 1993).

Comme on peut le voir sur la figure 13, le ruissellement augmente très rapidement jusqu'à des pentes de 2 à 5 % puis se stabilise et retombe à des valeurs de 10 % sur des sols cultivés sur pentes supérieures à 25 %. Cela pourrait s'interpréter en fonction de l'angle d'attaque des gouttes de pluies qui tombent perpendiculairement à la surface du globe, mais aussi en fonction de la formation rapide des croûtes de battance sur les pentes faibles, croûtes qui se déchirent dès que l'énergie du ruissellement dépasse celle des pluies, au-delà de 15 % de pente (ROOSE, 1973, 1994).

L'effet de la longueur de pente est complexe. D'une part, on comprend que la lame ruisselée s'accumule tout au long des parcelles (donc aussi l'énergie du ruissellement), mais par ailleurs tant que le ruissellement s'écoule en nappe il disperse cette énergie sur la rugosité de la surface du sol (mottes, tiges, mulch, cailloux) si bien que la vitesse du ruissellement en nappe n'augmente pas avec la longueur de pente. Par contre, sur les sols où le ruissellement s'organise rapidement en rigoles, le contact avec la surface mouillée du canal est réduit donc la vitesse, l'énergie du ruissellement et l'érosion augmentent. Il y a des interactions multiples avec le type de sol, sa rugosité, le type de végétation basse et les systèmes de cultures. Sur 580 parcelles couplées en fonction de la longueur de pente, dans 40 % des cas, W. WISCHMEIER (1966) a observé une augmentation de l'érosion si la longueur de pente augmente, dans 40 % des cas, il observe une diminution de l'érosion et dans 20 %, il constate une variation en fonction des états de surface du sol.

Cela remet en cause l'utilisation systématique du facteur pente pour déterminer les risques de dégradation des sols dans l'espace (avec la technologie des SIG).

La forme de la pente a aussi son importance. W. Wischmeier a montré que les pertes en terre sur une pente concave sont inférieures à celle d'une pente convexe, toutes autres conditions étant semblables. On peut jouer sur l'évolution de la forme d'un versant en créant des terrasses progressives concaves.

Enfin en milieu méditerranéen, les sommets des collines sont souvent calcaires et les sols très perméables : les eaux de surface s'infiltrent à faible profondeur jusqu'à un horizon peu perméable, puis circulent jusqu'au point de contact avec une couche moins perméable (marnes, schistes) où les eaux sortent d'un point de résurgence. De ces sources démarrent souvent des ravines remontantes qui drainent tout un versant.

### **Les techniques antiérosives conventionnelles**

Vue l'importance donnée aux pentes et au ruissellement linéaire, la majorité des aménagements antiérosifs des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles ont été développés autour des terrassements, des banquettes et fossés de diversion pour capter le ruissellement avant qu'il ne développe des ravines et l'évacuer latéralement dans des fossés qui vont les déverser dans des chemins d'eau naturels ou protégés qui rejoignent directement le réseau de drainage (rivières).

En réalité, dans les pays en développement, les paysans n'ont pas les moyens d'entretenir ces fossés qui s'ensablent rapidement et débordent en créant des ravines à travers tout le versant. De plus, les chemins d'eau, soit s'ensablent ou, plus souvent, se creusent en une ravine profonde. On n'a donc pas atteint l'objectif qui était justement d'éviter le ravinement. Grâce au diagramme de Hjulström (fig. 10), on peut comprendre que sur les sols limoneux des États-Unis, il n'y a pas de dépôt de sable dans les banquettes de diversion. Par contre, en Afrique, la majorité des sols sont sablo-argileux en surface et on peut observer ces dépôts en fin d'averse et la rupture des bourrelets après 4 à 10 ans (ROOSE, 1993).

### Le facteur humain

Le creusement des fossés, banquettes et autres terrasses demande entre 350 et 1 500 jours de travail manuel par hectare selon la distance de prélèvement des pierres, le type d'aménagement et de pente. De plus, l'entretien annuel exige encore 20 à 50 jours par hectare aménagé. Le paysan qui ne dispose pas dans sa famille d'une main-d'œuvre abondante est très vite limité : il n'a plus assez de temps pour soigner ses cultures (sarclages) et ses bêtes.

Or, beaucoup de ces aménagements mécaniques de terrassement ne réduisent pas la dégradation de la fertilité des sols entre les banquettes : l'érosion en nappe et la minéralisation de l'humus continuent. De plus, l'agriculteur est réticent à rendre sa parcelle difficilement mécanisable et à perdre 5 à 20 % de sa surface cultivable pour la consacrer à la lutte antiérosive dont il ne verra peut-être l'intérêt que dans plusieurs années. Il accepte d'investir dans sa propriété, à condition qu'il puisse constater une augmentation rapide de ses revenus qui compense l'augmentation de son travail : or il n'observe aucune amélioration des rendements entre les banquettes qui lui ont été imposées par des techniciens qui ne vivent pas de ce travail.

Par ailleurs, il se méfie du cadeau des agents de l'État qui offrent de planter des arbres fruitiers (amandiers et surtout oliviers) sur les banquettes, en compensation des pertes de production des autres cultures. Dans la tradition africaine, « qui plante un arbre marque sa terre » : si donc l'État plante des arbres, c'est qu'il souhaite prendre possession des terres paysannes (comme l'attestent différentes expériences en Algérie et en Tunisie). D'où un grand retard du développement de l'agroforesterie qui pourrait compenser partiellement les forêts parties en fumée pour étendre les parcours et cultures. De même, « blesser la terre » en y creusant ces fossés n'est pas accepté par toutes les sociétés rurales traditionnelles. D'où la réaction brutale de certains paysans qui s'efforcent de faire disparaître les banquettes à l'aide de leur charrue. En Algérie, 20 % des banquettes ont été effacées volontairement (HAMOUDI *et al.*, 1989). Enfin, les talus des banquettes se tassent et se dégradent rapidement (ARABI *et al.*, 2004). En Tunisie, qui connaît pourtant une grande expérience des aménagements en banquettes mécanisées, on estime que leur durée de vie moyenne ne dépasse pas 5 à 10 ans (BACCARI *et al.*, 2008).

# Le développement intégré

## Application des techniques de GCES ouvertes aux connaissances des savoir-faire traditionnels et à l'amélioration de la productivité des sols

Devant les échecs des grands projets d'aménagements antiérosifs (HUDSON, 1991), les participants de l'atelier de Porto Rico (1987) ont réfléchi aux causes des échecs et réussites de projets bien documentés. Ils ont proposé une série de nouvelles orientations qu'une équipe de praticiens et de chercheurs a publiée sous forme d'un manifeste (SHAXSON *et al.*, 1989). Quinze ans plus tard, ont été publiés les résultats des expériences menées sur cette approche nommée *Better Land husbandry* par les anglophones et Gestion conservatoire de l'eau et de la fertilité des sols (GCES) par les francophones (HUDSON 1992 ; ROOSE, 1994). Ce sont les conclusions de ces expérimentations que nous avons voulu appliquer au Maroc.

Les grands principes de la GCES pourraient être résumés ainsi :

- pour la durabilité des aménagements de LAE, il est nécessaire d'améliorer leur acceptabilité par les « bénéficiaires », de répondre aux problèmes immédiats des ruraux et en particulier, d'augmenter la productivité de la terre et du travail ;
- les paysans doivent être impliqués dans les projets de LAE dès le stade de diagnostic des problèmes, de définition des solutions, d'entretien et d'évaluation des aménagements ;
- une grande souplesse doit être développée dans le suivi et le financement des projets qui risquent d'évoluer au cours du temps en raison des premiers résultats expérimentaux ;
- deux défis doivent être relevés en même temps : améliorer significativement les rendements et préserver l'environnement rural : il faut donc prévoir des projets de développement intégré ;
- pour y arriver, il faut prévoir une agriculture intensive couvrant bien le sol, et une gestion raisonnée simultanée de l'eau, de la biodiversité et de la fertilité des sols.





Éric Roose Mohamed Sabir Abdellah Laouina

# Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc

*Valorisation des techniques  
traditionnelles méditerranéennes*



# Gestion durable des eaux et des sols au Maroc

## Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes

Éric ROOSE

Mohamed SABIR

Abdellah LAQUINA

avec la participation de

Faiçal BENCHAKROUN, Jamal AL KARKOURI,

Pascal LAURI, Mohamed QARRO

**IRD Éditions**

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DÉVELOPPEMENT

Marseille, 2010

Préparation éditoriale  
Marie-Odile Charvet Richter

Mise en page  
Bill Production

Maquette de couverture  
Michelle Saint-Léger

Maquette intérieure  
Pierre Lopez

Coordination, fabrication  
Marie-Odile Charvet Richter

**Photo de couverture**

**IRD/É. Roose – « Aménagement d'une vallée du Haut Atlas (Maroc) :  
cordons de pierres, terrasses en gradins irrigués et agroforesterie. »**

La loi du 1<sup>er</sup> juillet 1992 (code de la propriété intellectuelle, première partie) n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans le but d'exemple ou d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article L. 122-4). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon passible des peines prévues au titre III de la loi précitée.

© **IRD, 2010**

ISBN : 978-2-7099-1683-7