

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES RESSOURCES FORESTIERES

Cours de Conservation de l'Eau et du Sol
« Erosion hydrique et moyens de lutte »

Document destiné aux étudiants du Master 2 Foresterie toutes options

Présenté par : **Dr. Zékri Nadia**

Année universitaire 2022-2023

SOMMAIRE

1. EROSION DES SOLS.....	1
2. EROSION HYDRIQUE.....	2
2.1 Mécanismes de l'érosion hydrique.....	2
2.1.1 EROSION SPLASH.....	3
2.1.2 RUISSELLEMENT.....	4
2.2. Facteurs de l'érosion hydrique.....	6
2.2.1 ERODIBILITE	6
2.2.1.1 Définition.....	6
2.2.1.2 Facteurs agissants sur l'érodibilité des sols.....	6
2.2.2 EROSIVITE DES PLUIES	9
2.2.2.1 Définition.....	9
2.2.2.2 Paramètres de l'érosivité des pluies.....	9
2.3 Intégration des facteurs de l'érosion hydrique « Equation Universelle des pertes de sol ».....	12
2.3.1 USLE (Universal Soil Loss Equation).....	13
2.3.2 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation).....	14
2.3.3 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation).....	14
2.4 Formes de l'érosion hydrique.....	15
2.4.1 EROSION EN NAPPE.....	15
2.4.2 EROSION LINEAIRE.....	16
2.4.2.1 Erosion en griffes et en rigoles	16
2.4.2.2 Le ravinement.....	17
2.4.3 EROSION EN MASSE OU MOUVEMENTS DE MASSE.....	21
2.5 Rôle de la végétation dans l'atténuation des phénomènes érosifs	24
2.5.1 ROLE DU COUVERT VEGETAL.....	24
2.5.2 INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LES PROCESSUS DE L'EROSION HYDRIQUE.....	25
2.5.2.1 Sur le Splash.....	25
2.5.2.2 Sur le ruissellement.....	25
2.6 L'ampleur de l'érosion hydrique dans l'Algérie septentrionale....	26

3. LES MOYENS DE LUTTE CONTRE L'EROSION HYDRIQUE	28
3.1 Les stratégies modernes	28
3.1.1 LA RESTAURATION DES TERRAINS DE MONTAGNE « RTM ».....	29
3.1.2. LA CONSERVATION DE L'EAU ET DES SOLS « CES ».....	29
3.1.3. LA DEFENSE ET RESTAURATION DES SOLS « DRS ».....	29
3.1.4. La GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU, DE LA BIOMASSE ET DE LA FERTILITE DU SOL « GCES ».....	30
3.2. Les procédés mécaniques et biologiques	31
3.2.1. LES PROCEDES MECANIQUES.....	31
3.2.1.1 Les terrasses.....	31
3.2.1.2 Les murettes en pierres sèches.....	31
3.2.1.3 Les cordons en pierres.....	32
3.2.1.4 Les banquettes.....	33
3.2.1.5 La correction torrentielle	34
3.2.1.5.1 Les seuils de correction torrentielle utilisés en Algérie.....	35
3.2.1.5.1.1 Les gabions.....	35
3.2.1.5.1.2 Les seuils en pierres sèches.....	36
3.2.1.5.1.3 Les seuils en terre.....	38
3.2.1.5.1.4 Les seuils en pneus usagers.....	39
3.2.1.5.2 Phases d'exécution des travaux de correction torrentielle.....	40
3.2.1.5.2.1 Piquetage des emplacements des seuils.....	40
3.2.1.5.2.2 Fondation des seuils.....	41
3.2.1.5.2.3 Ancrage des seuils.....	41
3.2.2 LES PROCEDES BIOLOGIQUES.....	43
3.2.2.1 Le mulching.....	43
3.2.2.2 Les haies vives ou mortes.....	43
3.2.2.3 La culture selon les courbes de niveau.....	44
3.2.2.4 La culture en bandes alternantes.....	45
3.2.2.5 Le reboisement.....	46
3.2.2.5 La plantation fruitière	47
3.2.2.6 La Fixation des berges.....	47
3.2.2.7 Les cordons végétaux.....	49
Annexe : Autres ouvrages de lutte antiérosive utilisés dans le monde	50

1. EROSION DES SOLS

L'érosion des sols est un phénomène naturel inévitable dans l'évolution des paysages et de la modification du relief terrestre. C'est un processus complexe, il concerne l'arrachement, le transfert et la sédimentation des particules de sol par l'eau, le vent ou la gravité (Roose et *al.* 1998). Elle devient plus dangereuse lorsqu'elle est exacerbée par les pratiques effarantes de l'homme.

Ils existent plusieurs types d'érosion dont :

- **L'érosion géologique appelée aussi naturelle ou normale** : c'est un processus inévitable qui se traduit par l'érosion des terres dans leur milieu naturel sans l'influence de l'homme. Elle s'étale sur une longue période géologique et elle est plus active et plus spectaculaire en montagnes. Elle creuse de profondes ravines surtout dans les montagnes jeunes avec roches tendres et des pentes déboisées.
- **L'érosion mécanique sèche ou aratoire** : c'est un phénomène très peu connu, très peu quantifié. Elle n'est pas dû ni à l'intervention de l'eau ni à celle du vent mais c'est le résultat des pressions répétitives exercées par la simple poussée des instruments aratoires. Ce qui a pour effet de transporter des masses de terre vers l'aval des toposéquences. Les quantités de terre déplacées sont fonction du type d'outil ou d'engin, de la fréquence de son passage, de l'orientation du travail et de la pente.
- **L'érosion accélérée appelée aussi contemporaine ou anthropique** : c'est un phénomène provoqué par une perturbation de l'équilibre naturel, dont l'eau et le vent sont les facteurs essentiels auquel s'ajoute l'homme avec ces pratiques inappropriées.

La dégradation des sols par l'érosion est l'un des problèmes majeurs auquel sont confrontées la majorité des nations à travers le monde. La croissance démographique et l'augmentation du niveau de vie ont induit à une demande de plus en plus importante en produits alimentaires, en eau et en habitat. Cette demande progressive, où les besoins des populations dépassent souvent la production des écosystèmes, a poussé l'homme à utiliser des pratiques inappropriées qui ont bouleversé leur équilibre naturel et ont induit à une érosion accélérée. Cette dernière gagne chaque année de plus en plus de terres, réduisent leur capacité de régénération en devenant parfois totalement stériles (Zékri et Tounkob, 2021).

Les surfaces érodées s'étendent sur plus de dix millions d'hectares par an, dont la principale cause est l'érosion hydrique. Cette dernière est responsable de la dégradation de 56 % des terres, suivie par l'érosion éolienne avec 28%, la dégradation chimique (acidification, salinisation) avec 12% et la dégradation physique (compaction) avec 4% (Roose et *al.* 2010).

En Algérie l'érosion hydrique a dégradé 45% des zones telliennes soit 12 millions d'hectares, voire même plus aujourd'hui (Chebbani et *al.* 1999). La région Ouest est la plus érodée avec 47% de l'ensemble des terres érodées, viennent ensuite les régions du centre et de l'Est avec respectivement 27% et 26% des terres érodées (MATE et GTZ, 2000). Cette érosion, sous ces différentes formes, occasionne des pertes en terres considérables.

Pour toutes ces raisons le contenu de ce polycopié sera consacré qu'à l'érosion hydrique (mécanismes, types, causes et conséquences) ainsi que ces moyens de lutte (procédés mécaniques et biologiques) utilisées dans le monde et notamment en Algérie.

2. EROSION HYDRIQUE

L'érosion hydrique, dont l'agent causal est l'eau, est appelée aussi érosion hydraulique ou érosion pluviale. Elle est définie comme étant le détachement des particules du sol par l'effet des précipitations et du ruissellement ainsi que leur transport et leur dépôt le long du trajet.

L'érosion pluviale, sévit dans toutes les zones climatiques et a pour effet de décaper les horizons de surface les plus fertiles, et même dans les cas graves, la totalité du profil. Elle est souvent sélective, dans la mesure où elle élimine préférentiellement la matière organique et la fraction fine, laissant sur place les fractions grossières (Duchaufour, 2001).

2.1 Mécanismes de l'érosion hydrique

L'action érosive de l'eau sur le sol se déroule en deux étapes distinctes :

- l'une consiste au détachement des particules de sol, par l'attaque des gouttes de pluie, appelée battance des sols ou effet Splash ;
- l'autre consiste à les transporter en son sein et dans sa propre direction, c'est le ruissellement.

2.1.1 EROSION SPLASH

L'érosion Splash, appelée érosion élémentaire est due au choc de la goutte d'eau de pluie sur le sol. Celle ci désagrège les particules du sol qui rejaillissent. Cette action de rejaillissement est liée à l'énergie cinétique libérée par les gouttes de pluie en arrivant sur le sol. L'énergie cinétique est égale au demi-produit de sa masse par le carré de sa vitesse :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

Où : **m** est la masse de la goutte et **V** sa vitesse de chute.

E_c est l'énergie cinétique en joule (si **m** est en kg et **V** en m/s).

Le diamètre des gouttes de pluie, leur vitesse de chute et leur masse totale détermine la capacité de détachement des particules du sol.

Le rejaillissement peut projeter les particules du sol jusqu'à 60 cm verticalement et 1.5 m horizontalement (Leblond et Gherin, 1984) et la masse de sol détachée **D_p**, peut être quantifié expérimentalement, par la relation (Poessen, 1984):

$$D_p = a \cdot E_c^b$$

Où: **D_p** est la masse détachée et les coefficients **a** et **b** dépendent essentiellement de la texture et de la structure du sol.

L'érosion par rejaillissement conduit à la fermeture de la surface du sol et la réduction de son infiltrabilité en formant une croûte de battance d'une épaisseur de un à deux centimètres. La rugosité de la surface du sol disparaît, elle devient lisse et perd sa perméabilité, il y a donc ruissellement.

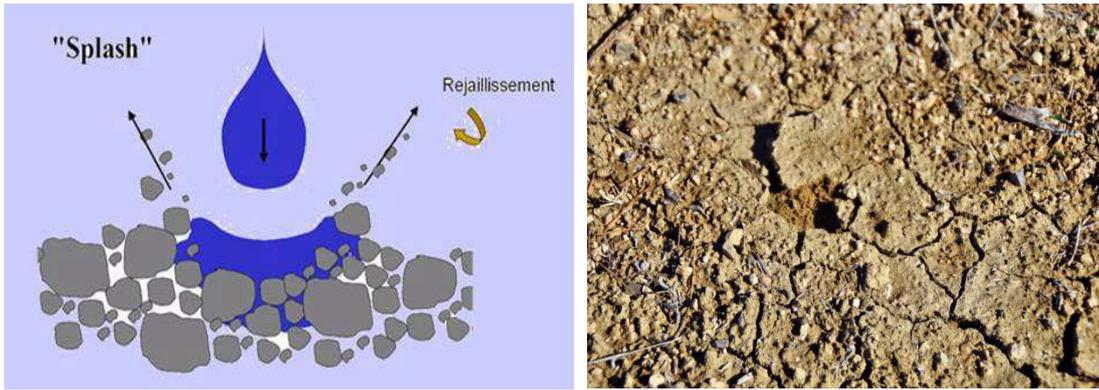


Figure 1 : Effet Splash (websself.net)

Photo 1 : Croûte de battance formé par effet Splash.
Cliché Zékri N. : Magnia 05/12/2017

2.1.2 RUISSELLEMENT

Le ruissellement est l'écoulement des eaux par gravité à la surface du sol, suivant la pente du terrain. C'est aussi l'écoulement dans les micro-réseaux hydrographiques, des eaux météoriques qui ont échappé à l'infiltration, à l'évaporation et au stockage superficiel. Il ne ferait donc qu'extérioriser (par un déplacement) un détachement dont il ne serait pas à proprement responsable (Boiffin, 1984).

Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il commence généralement selon Chebbani et *al* (1999) après 22 mm de pluie si le sol est sec ou après 4 mm si le sol est humide, encroûté ou compact.

Il peut être diffus "ruissellement en nappe" (il entraîne les particules fines détachées des agrégats, alors que les particules grossières restent sur place) ou concentré "ruissellement en griffes et rigoles" (il se concentre dans les zones à circulation préférentielle de l'eau liée au microrelief).

Chebbani et *al* (1999), notent que le ruissellement peut être à l'origine d'une érosion spectaculaire qui se traduit par le creusement de chenaux, de forme et de tailles diverses et s'accompagne de la mise en place de dépôts d'étendue et d'épaisseur très variables.

Les facteurs qui agissent sur le ruissellement sont surtout : l'infiltration, la rugosité de surface, la topographie et le couvert végétal :

✓ L'infiltration

Pour un sol homogène initialement non saturé, la surface du sol présente une certaine infiltrabilité définie comme le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue en contact avec de l'eau à la pression atmosphérique. Au cours du temps, cette infiltrabilité baisse sous l'effet de la compaction des sols, que ce soit sous l'action des agents climatiques ou par l'action de l'homme ; ceci conduit à une réduction de la porosité, donc à une réduction de la conductivité hydraulique. La diminution de la capacité d'infiltration constitue ainsi un facteur défavorable générateur de ruissellement et de transport de sédiments.

✓ Détention superficielle et rugosité du sol

La détention superficielle correspond à la capacité de stockage temporaire de la surface du sol. Elle se fait sous forme de flaques dans les micro-dépressions, dont la capacité de stockage est liée à la rugosité.

✓ Pente et longueur de pente

L'influence de la pente est complexe. Dans plusieurs cas on a observé une réduction du volume ruisselé lorsque la pente augmente (Roose, 1993), mais, le plus souvent, l'érosion augmente avec la pente car elle se développe une érosion en rigoles dix fois plus agressive que l'érosion en nappe (Roose et al. 1998). Quant à la longueur de pente, il semble que son influence sur la naissance de rigoles dépend de diverses interactions avec la rugosité et la perméabilité du sol, le type et l'abondance du couvert végétal.

✓ Le couvert végétal

Le couvert végétal est très efficace pour réduire le ruissellement. La couverture du sol, plus particulièrement celle assurée par la strate herbacée et les résidus végétaux, constitue la protection la plus efficace de la surface du sol. Elle intervient vis-à-vis de la pluie par :

- L'interception nette : une partie de pluie qui tombe sur la végétation est directement reprise par l'évaporation. Elle ne participe alors, ni à l'infiltration, ni au ruissellement ;
- La dissipation de l'énergie cinétique : une partie de la pluie interceptée par le feuillage continue sa course jusqu'au sol. L'énergie cinétique des gouttes s'en trouve alors modifiée. L'expérience montre que l'efficacité d'un couvert végétal à l'égard de l'infiltration est d'autant plus marquée que le dernier élément récepteur est bas (Ruiz Figueroa et Valentin, 1983).

2.2. Facteurs de l'érosion hydrique

Les facteurs qui décrivent le processus de l'érosion hydrique se divisent en deux catégories :

- des facteurs de premier ordre qui sont des facteurs physiques, décrivant le relief, l'occupation du sol et les différents types d'aménagements ;
- des facteurs de second ordre issus de la combinaison des caractéristiques climatiques et celles physiques, régissant ainsi le ruissellement et le comportement hydrologique du bassin versant.

Actuellement deux termes relatifs à l'érosion hydrique sont utilisés pour regrouper ces facteurs. Ils s'agissent de l'**érosivité** (agents climatiques) et de l'**érodibilité** (agents structuraux, lithologie et couvert végétal).

2.2.1 ERODIBILITE

2.2.1.1 Définition

L'érodibilité est l'aptitude globale d'un sol à être érodé. Elle permet indépendamment des précipitations de comparer la sensibilité ou la résistance de différents sols aux actions érosives de la pluie et du ruissellement (Talbi, 1997).

Elle est fonction de trois principaux facteurs : le premier inhérent à la nature du sol (à sa structure, sa texture, sa composition chimique et sa teneur en matière organique). Le deuxième exprime l'influence des conditions topographiques alors que le troisième est lié à l'aménagement du sol, aux pratiques agronomiques et principalement à la couverture végétale.

2.2.1.2 Facteurs agissants sur l'érodibilité des sols

✓ Erodibilité liée au facteur sol

Les sols sont composés de différents éléments et ont certaines propriétés qui leur permettent de résister au phénomène de l'érosion dont les principales sont (Talbi, 1997) :

- Teneur en matières organiques : les éléments organiques présents dans le sol sont généralement localisés en surface et constituent l'humus. Ce dernier regroupe

l'ensemble des cadavres animaux ou végétaux à différents stades de décomposition, les éléments minéraux provenant de la roche mère sous-jacente, ou les apports extérieurs d'eau et d'air. La teneur en matières organiques influe directement sur la stabilité structurale du sol; elles sont proportionnelles.

- La texture : elle est définie comme la proportion des éléments du sol, classés par catégorie de grosseur après destruction des agrégats. Ces éléments sont classés comme suit:
 - Pierres : diamètre supérieur à 20 mm
 - Gravier : diamètre de 2 à 20 mm
 - Sable grossier : diamètre de 0.2 à 2 mm
 - Sable fin : diamètre de 0.02 à 0.2 mm
 - Limon : diamètre de 0.002 à 0.02 mm
 - Colloïdes minéraux : diamètre inférieur 0.002 mm

L'appréciation de la proportion de chacun de ces éléments, à laquelle il faut ajouter celle de la matière organique et du calcaire, permet de définir la texture du sol en question.

- La structure : c'est la disposition et l'agencement de ses éléments en agrégats ou sous une forme dispersée. Elle joue un rôle dans sa résistance à l'érosion, en intervenant aussi dans sa perméabilité.
- La perméabilité : elle s'exprime par la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité et elle est d'autant plus élevée que la porosité non capillaire est plus forte. La structure a une influence prééminente, par rapport à la texture, sur la perméabilité. Les sols à structure stable sont en général perméables. Par contre, lorsque la composition physique du sol et sa granulométrie sont mal équilibrées, le sol est peu perméable. C'est le cas des sols pauvres en matières organiques et à teneur excessive en limons.

La résistance d'un sol à la dégradation et au transport de ses éléments dépend de sa texture, de sa structure, de sa teneur en matières organiques, de sa teneur en calcaire, etc. Les propriétés physiques qui en découlent (stabilité structurale, sensibilité au tassement, perméabilité, rétention en eau, etc.) conditionnent le sol à résister aux agressivités climatiques.

On considère généralement que les sols riches en humus et en argiles offrent une bonne résistance à l'érosion, en raison de leur forte stabilité structurale et leur perméabilité. De

même, les sols à texture grossière limitent leur érosion par une perméabilité très élevée. Lorsque l'intensité des précipitations devient supérieure à la capacité d'absorption, ces sols sont alors très vulnérables, car ils sont peu structurés et ne possèdent pas une cohésion suffisante. Les sols les plus sensibles à l'érosion sont les silts (les limons), les sables fins, lorsqu'ils ont une teneur trop faible en matières organiques et en argiles (Viani, 1986).

✓ Erodibilité liée au facteur topographique

La forme de la croûte terrestre a été établie grâce à des mouvements orogéniques, fixant les pentes initiales et influant sur la direction des cours d'eau, la forme des versants, etc.

La pente du terrain est le paramètre qui influe le plus sur l'intensité du processus érosif, en augmentant surtout la vitesse du ruissellement; la pente conditionne la forme et l'intensité de l'érosion hydrique. Relevons encore la courbure de la pente, favorisant la sédimentation lorsqu'elle est concave, alors qu'elle augmente l'érosion lorsqu'elle est convexe. La longueur de la pente est également un paramètre d'importance, puisqu'elle limite ou accroît la quantité et la vitesse du ruissellement de surface.

✓ Erodibilité liée au facteur agronomique

Les pratiques agronomiques jouent un rôle fondamental dans la définition de l'intensité et des formes de l'érosion. Parmi l'ensemble des pratiques, modifiant l'érodibilité d'un sol, relevons l'influence du travail du sol et plus particulièrement celle du couvert végétal.

La couverture végétale joue le rôle d'élément protecteur contre l'agressivité du climat, car à l'égard des précipitations, le rôle de ce couvert est primordial. Il consiste en une modification quantitative de l'alimentation hydrique de la couche superficielle du sol.

Lorsque les gouttes d'eau frappent directement un sol nu, la pluie provoque un tassement du sol et réduit, par conséquent, sa porosité. Au contraire, le prolongement de la durée de l'arrosage du sol, longtemps après la fin de l'averse, favorise une importante infiltration. Les eaux du ruissellement voient en effet leur vitesse de progression et leur force vive fortement diminuées, ralentissant ainsi l'action de l'érosion hydrique.

Les restes des récoltes et la culture du sol ont une grande influence sur la quantité et la vitesse de l'eau, qui s'écoule à la surface. Plus la surface est sèche, plus l'eau est freinée et plus il lui reste le temps pour s'infiltrer, du moins en partie, dans le sol.

2.2.2 ÉROSIVITE DES PLUIES

2.2.2.1 Définition

L'érosivité est définie comme étant la capacité potentielle d'une précipitation à causer l'érosion. Elle permet d'exprimer indépendamment du type de sol, l'agressivité d'un événement pluvieux par rapport à un autre. Cette agressivité est directement fonction des caractéristiques physiques de l'averse (Viani, 1986).

2.2.2.2 Paramètres de l'érosivité des pluies

Plusieurs paramètres interviennent dans l'action d'érosivité des pluies :

- Intensité des pluies

L'intensité des pluies est la quantité d'eau reçue en une unité de temps (mm / jour ou mm / heure). Elle est mesurée à l'aide de pluviographe enregistreur. Pour chaque pluie, l'appareil trace une courbe particulière sur le pluviogramme. C'est le paramètre principal qui lie la pluie à l'érosion, il :

- intervient dans le calcul de l'énergie cinétique et dans celui de la plupart des indices d'érosivité ;

- détermine les modalités d'infiltration de l'eau dans les sols. Les fortes intensités par exemple entraînent la conjonction des phénomènes d'engorgement et de battance qui aboutissent à la formation de croûtes (quelques cm) ou des pellicules (quelques mm) très peu perméables.

Des observations effectuées à Madagascar ont montré qu'une pluie d'intensité inférieure à 1.5 mm/mn est rarement érosive, alors qu'une pluie d'intensité supérieure à 2 mm/mn est toujours érosive. La valeur de 2 mm/mn est celle à partir de laquelle se déclenche l'érosion. Alors qu'aux Etats-Unis, en Arkansas, on estime que sur une terre nue, limoneuse, dont la pente est faible (6%), l'érosion se manifeste dès que la chute de pluie atteint 2.5 mm en 5 minutes (Leblond et Gherin, 1984). En Algérie les pluies sont considérées comme dangereuses lorsque l'intensité est de 15 mm en 15 minutes (Belmahi, 1998).

- Hauteur des pluies

La hauteur des pluies est définie comme étant l'épaisseur de la lame d'eau accumulée sur une surface horizontale en supposant que toutes les précipitations reçues par elle s'y trouvent immobilisées.

Elle a une liaison étroite avec le ruissellement, car elle est toujours fonction des autres caractéristiques de la pluie : la durée et l'intensité maximale. Roose (1973) et Gardner (1975) montrent que l'érosion et le ruissellement sur parcelle nue sont des fonctions rectilinéaires de la hauteur de pluie (sans donner des formules), et Hudson (1971) a trouvé un coefficient de corrélation $r = 0.74$ entre les précipitations caractérisées par leurs hauteurs et le Splash (in Mouzai, 1987).

Goujon (1968), note que pour pouvoir déclencher les phénomènes d'érosion, la hauteur d'eau tombée au sol doit atteindre au moins 20 à 30 mm pour une même averse, au-dessous de 20 mm, la pluie est absorbée par le sol et n'entraîne aucun ruissellement mesurable.

Les hauteurs de pluies minimales tombées en 24 heures à partir de laquelle les précipitations sont qualifiées comme érosives (torrentielles) varient selon les régions bioclimatiques : Vaudour (1977), les fixe à 20 mm dans la région de Madrid, De Fontaine et Moutard (1968) à 40 mm dans le Vivarais, Bonvalot et Hamza (1976) à 20 mm en Tunisie et Seltzer (1946) à 30 mm en Algérie (in Belmahi, 1998).

Paradoxalement certains auteurs considèrent qu'à une certaine hauteur de pluie l'érosion est atténuée. Martin et *al.* (1997), notent que lorsque les précipitations sont très violentes, la lame d'eau à la surface du sol peut devenir épaisse pour protéger celui-ci de l'impact des gouttes de pluie mais ils ne disposant pas malheureusement de mesures pour préciser le seuil d'intensité à partir duquel l'érosion se trouve atténuée pour un volume de pluie donné.

La hauteur de pluie peut être un bon estimateur de l'énergie cinétique. La formule donnée par Greenlan (1977) est (in Mouzai, 1987) :

$$E_c = 38,8 R_a - 4,7 \cdot 10^{-4}$$

Où : E_c est l'énergie cinétique en J/m^2 et R_a est la quantité de pluie (hauteur de pluie) en mm. Avec un le coefficient de corrélation $r = 0.99$.

- Energie cinétique

L'énergie cinétique de la pluie est le facteur de base dans la détermination de l'érosivité de la pluie. Smith et Wischmeier (1962), ont constaté que le diamètre médian des populations de gouttes de pluie, et donc leur masse, leur vitesse et leur énergie cinétique augmente avec l'intensité des précipitations. Il existe d'ailleurs une relation empirique reliant l'intensité d'une pluie à son énergie cinétique (Wischmeier et Smith, 1959 ; in Djelloul-Smir et Chiali, 1991) :

$$E_c = 11.9 + 8.73 \log I_p$$

Où : E_c : Energie cinétique en $j / m^2 / mm$ et I_p : Intensité de pluie en mm / h .

Laws et Parsons (1943) ont relié le diamètre de la goutte avec l'intensité de pluie. Ils ont trouvé la relation suivante (in Mouzai, 1987) :

$$D_{50} = 2.23 I^{0.182}$$

Où : D_{50} : diamètre médian et I : intensité en $mm / heure$

Selon différents auteurs, quand l'intensité moyenne de la pluie passe de 1 à 100 mm/h, le diamètre moyen des gouttes passe de 1 à 3 mm et leur vitesse passe de 2 à 8 m/s. Il semble que la vitesse finale au sol ne dépasse jamais 10 mètres par seconde (in Djelloul-Smir et Chiali, 1991)

- Durée des pluies

La durée de la pluie a une influence sur le taux de saturation de l'horizon superficiel du sol. Les pluies durables provoquent la saturation du sol en eau, l'infiltration diminue et il y a donc ruissellement à la surface.

Laouina (1998), a noté que ce sont les périodes pluvieuses durables avec des événements de forte intensité répétitifs qui occasionnent la dégradation la plus forte, avec le passage du ruissellement aréolaire au ruissellement en griffes et rigoles. Les pluies intenses et brèves, ne permettent qu'une dégradation modérée.

- Fréquence des pluies

Elle caractérise la répartition d'une pluie dans le temps. La fréquence $f = 1/T$, dont T est le nombre d'années de la période de retour. Elle est utilisée dans l'établissement des courbes Intensité – Durée – Fréquence qui matérialisent la notion de risque climatique, utilisée dans différentes spécialités : hydrologie, génie rural.

Les averses sont plus dangereuses quand elles se suivent à intervalles rapprochés ; le sol est saturé par la première pluie, l'eau n'a pas le temps de s'évaporer ou de s'infiltrer et lorsque tombe l'averse suivante, elle ruisselle entièrement et provoque presque toujours une érosion importante (Goujon, 1968).

2.3 Intégration des facteurs de l'érosion hydrique « Equation Universelle des pertes de sol »

Les facteurs de l'érosion pluviale ont été d'abord intégrés dans une formule donnée par Smith et Whitt, en 1948 pour estimer l'érosion dans les principaux sols du Missouri. Ils ont présenté une équation "rationnelle" où s'introduits les facteurs relatifs aux degrés de protection offerts par le couvert végétal "C", et celui offert par les pratiques culturales ou antiérosives "P". Ces deux pionniers ont reconnu par la suite, le besoin de la prise en compte d'un facteur de pluie R pour rendre cette équation applicable sur plusieurs Etats.

Les efforts de ces auteurs, et d'autres à l'exemple de WHISCHMEIER, ont conduit à la combinaison de tous les facteurs identifiés concourant à la description du phénomène érosif et à la quantification des pertes de sols dans une formule qui a été appelée « Equation Universelle des pertes de sol ».

Cette formule, appliquée à une région donnée, permet d'estimer les pertes en terre et de déterminer les mesures antiérosives à mettre en œuvre pour ne pas dépasser un seuil de perte de terre au delà duquel l'érosion devient dangereuse (Leblond et Guerin, 1984).

2.3.1 USLE (Universal Soil Loss Equation)

Wischmeier et Smith (1978), ont combiné les facteurs concourant à la description du phénomène érosif et à la quantification des pertes de sol dans la formule suivante, appelée équation universelle de pertes de sol (**USLE** : Universal Soil Loss Equation) :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

A : la perte de terre prévue par unité de surface (en tonnes par acre : une tonne courte américaine = 0.907 kg, 1 acre \cong 4000 m²).

R : Facteur d'érosivité des pluies (ou indice d'agressivité climatique).

K : Facteur d'érodibilité du sol (ou indice sol), c'est un facteur sans dimension qui mesure la plus ou moins grande résistance relative d'un sol à l'érosion. Ces valeurs sont obtenues expérimentalement.

L .S : Facteur topographique (ou indice pente), sans dimension, il caractérise l'effet de l'inclinaison de la pente (degré S, en %) et la longueur de la pente (L).

C : Facteur du couvert végétal (ou indice culture), c'est le rapport des pertes de terre d'une terre cultivée dans des conditions bien définies à celle d'une jachère continuellement travaillée où C = 1.

P : Facteur lié à la gestion des terres et aux pratiques antiérosives (ou indice de conservation de l'eau et du sol), c'est le rapport des pertes de terre d'un champ sur lequel on applique des pratiques conservatrices à celle d'un champ cultivé, selon la ligne de la plus grande pente.

Nsabimana (1999), a appelé les facteurs R et SL " facteurs moteurs ou accélérateurs " de l'érosion hydrique et les facteurs K, C et P " facteurs frein " de l'érosion hydrique.

Le modèle USLE, a pour objectif principal l'estimation des pertes de terre moyennes annuelles de deux formes de l'érosion hydrique : l'érosion en nappe et l'érosion en rigoles et de déterminer ainsi les mesures antiérosives à mettre en œuvre pour ne pas dépasser un seuil de perte de terre au delà duquel l'érosion devient dangereuse. Il permet de visualiser rapidement les zones où les interventions semblent nécessaires (Kertész, 2000).

Il considère les facteurs de l'érosion comme indépendants et néglige les interactions entre eux et il ne tient pas compte de la quantité de terres érodées et transportées à l'exutoire d'un bassin versant par l'action du ruissellement.

Les valeurs obtenues par ce modèle peuvent ne pas correspondre avec la réalité, mais elles donnent une idée relative de l'importance des risques d'érosion entre les zones (Ortolli et Maurer, 2000).

Il existe un grand nombre de recherches dédiées à la révision et à la modification du modèle USLE, pour son adaptation à des régions autres que celles qui ont servi de sites d'expérimentation à son élaboration d'où l'apparition d'autres versions du modèle, appelées « *Equations de Wischmeier Modifiées* ». Ces modèles sont des variantes de l'équation originale « USLE » (Talbi, 1997).

2.3.2 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)

Ce modèle est de la forme :

$$A = R_m \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Dans ce modèle, l'indice d'érosivité prend une nouvelle expression qui dépend non seulement de l'effet érosif dû aux précipitations, mais aussi de celui dû au ruissellement. Il est de la forme suivante:

$$R_m = 0,5 Ec I_{30} + 3,5 v \cdot V^{1/3}$$

Où : v : volume total de ruissellement et $V^{1/3}$ volume de ruissellement de pointe.

2.3.3 RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

Ce modèle est de la forme:

$$A = R_r \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Il a été élaboré par Renard et *al.* (1993), en se basant sur les résultats des recherches et expériences faites depuis 1978 par Wischmeier et Smith. Ils avaient comme objectifs

l'ajustement des paramètres de l'USLE, ayant constaté que le modèle de base n'avait pas la même précision dans toutes les régions des Etats-Unis (in Talbi, 1997).

Nous signalons que l'application de ces deux derniers modèles, nécessite des données dont la collecte n'est pas évidente à l'échelle de notre pays ainsi que de quelques logiciels spécifiques non disponibles.

Kertész (2000), a noté que selon leurs expériences, l'USLE s'est révélé à ce jour le modèle le plus fiable dans l'estimation de la perte de sol.

2.4 Formes d'érosion hydrique

La connaissance des différentes formes d'érosion, leurs processus et leurs symptômes sur le terrain est très recommandée pour un forestier, pour définir les aménagements antiérosifs spécifiques pour chaque type.

2.4.1 EROSION EN NAPPE

Appelée aussi érosion laminaire ou aréolaire, elle entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface par l'énergie des gouttes de pluie. Elle se traduit par le décapage sélectif plus au moins uniforme de la couche superficielle du sol par l'eau de ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion hydrique (Roose, 1994).

C'est la forme d'érosion la plus courante bien que ses effets symptomatiques paraissent moins perceptible puisqu'elle concerne les particules fines du sol (argiles, limons et matière organique) jusqu'à ce que l'horizon humifère soit totalement perdu.

Elle occasionne des dégâts considérables sur des longues périodes, du fait qu'elle est peu visible d'une année à l'autre puisqu'une érosion de 15 à 30 t/ha/an correspond à une perte de hauteur de 1 à 2 mm (Roose et *al.* 2010).

Les signes les plus connus de l'érosion en nappe sont la remonté des cailloux à la surface du sol. La squelettisation des horizons superficiels par perte sélective de la matière organique entraînant la perte de la couleur foncée humifère pour devenir plus clair, plus ocre ou rouge selon la nature des couches inférieurs. Elle se manifeste généralement sur faible pente.



Photo 2 : perte de la couleur foncée du sol par le décapage sélectif. Cliché Zékri N. : Remchi 12/2016



Photo 3 : remonté des cailloux à la surface du sol. Cliché Zékri N. : Maghnia 05/2000

2.4.2 EROSION LINEAIRE

Lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques, ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et lorsque ces filets d'eau atteignent une certaine vitesse, 25 cm/s d'après Hjulstrom (1935), ils acquièrent une énergie propre qui va créer une érosion limitée dans l'espace par des lignes d'écoulement. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais elle se concentre sur des lignes de plus forte pente.

L'érosion linéaire est donc un indice que le ruissellement s'est organisé, qu'il a pris de la vitesse et acquis une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses. Non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe sélective, mais des graviers ou des cailloux et des blocs lorsqu'il sera organisé sur des lignes d'écoulement.

2.4.2.1 Erosion en griffes et en rigoles

Lorsque le ruissellement s'organise, il creuse des formes évidentes de plus en plus profondes suivant les lignes de moindre résistance. On parle de griffes lorsque les petits canaux ou micro filets ont moins de 10 cm de profondeur et de rigoles lorsque celles-ci dépassent les 10 cm. Ces deux formes d'érosion peuvent être effacées par la machinerie aratoire. Si les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais leur largeur atteint plusieurs mètres on parle de nappes ravinantes et de ravines lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de

centimètre (plus de 50 cm) et qu'ils ne peuvent plus être effacés par les techniques culturales normales (Roose et *al.* 2010).



Photo 4, 5 et 6 : Erosion en griffes et rigoles. Clichés Zékri N. : Maghnia 11/12/2012



Photo 5 : stade griffes

Photo 6 : stades griffes et rigoles

2.4.2.2 Le ravinement

C'est la forme la plus redoutable de destruction des sols. Il intéresse la couche arable et les couches les plus profondes du sol allant jusqu'à la roche mère. Sa dynamique peut se ramener à deux mécanismes principaux : l'érosion en profondeur et l'érosion remontante ou régressive. La première s'attaque au fond de la ravine et a pour effet d'approfondir et d'élargir celle-ci. La deuxième allonge le champ de l'aval vers des zones amont non ravinées, développe le réseau hydrographique et accroît sa densité en créant de nouveaux affluents.

Les dégâts causés sont d'autant plus importants que la stabilisation et la réparation de cette forme d'érosion sont les plus coûteux de tous les travaux de lutte contre l'érosion. Comme pour les autres processus de l'érosion hydrique, cette forme d'érosion déprécie considérablement la valeur et la productivité des terres agricoles. Les ravins et les ravines, sont responsables de la mobilisation et du transport des sédiments vers l'aval des bassins-versants. En plus de leur contribution substantielle à l'envasement des barrages, ils occasionnent une perte directe du patrimoine foncier.

Le phénomène du ravinement peut donner des ravines de 0.20 à 2 mètres de profondeur voire même des torrents de profondeur supérieure à 2 m. Ces derniers représentent le stade ultime de l'érosion linéaire appelé communément « badland » en anglais ou mauvaise terre en français ou plus scientifiquement « ravinement généralisé ». Ils occasionnent des pertes en terre de 100 à plus de 300 t/ha/an (Roose et *al.* 2010).

Les ravines sont classées généralement selon le stade de leur évolution (actif ou inactif), leur forme (continue ou discontinue), leur section (en U, en V, etc.) et leur dimension (petite, moyenne ou grande).

Dans la nature, on observe le plus souvent des ravines en forme de « V ». Elles se développent sur des matériaux homogènes, plus ou moins meubles, sablo-argileux, argileux, marneux ou schisteux. Une fois la couverture pédologique décapée, le ravinement progresse en deux temps. Durant une première période de plusieurs mois la roche se détend sous l'effet de l'alternance de périodes sèches et humides et libère des particules de la taille des sables grossiers. Dans un deuxième temps, à l'occasion d'une averse abondante tombant sur un sol déjà humide, le fond de ravine est décapé par le ruissellement venant de l'impluvium.

Le décapage du fond de ravine au-delà des sédiments déposés lors de la première période maintient le déséquilibre des berges et la forme en « V » de la ravine au cours de sa croissance. Pour stabiliser ces ravines il suffit d'empêcher l'évacuation des sédiments détachés des berges par un seuil pour bloquer l'enfoncement de la ravine, réduire la pente des versants jusqu'à atteindre la pente d'équilibre de ces matériaux altérés et provoquer la végétalisation naturelle des berges. Pour réhabiliter définitivement la ravine, il faut encore réduire le débit de pointe du ruissellement provenant du bassin versant, ce qui est généralement plus difficile à réaliser, et revégétaliser la ravine et ses environs immédiats.



Photo 6 et 7 : ravines en V. Cliché Zékri N. Maghnia le 05/12/2017

Les ravines en U se développent sur matériaux hétérogènes. Soit elles ont un fond constitué de matériaux très résistants : lors des crues exceptionnelles le canal va donc s'élargir latéralement par effondrement. Soit, la couche de résistance se trouve en surface, le ruissellement creuse alors profondément le matériau jusqu'à atteindre une nappe d'eau temporaire ou permanente qui va exercer une poussée latérale sur le bas du versant jusqu'à ce que celui-ci s'effondre.

Il existe une troisième forme de ravinement encore plus difficile à traiter : les ravines en tunnel ou tunneling. Elles peuvent se développer sur pentes faibles, dans un matériau fissuré en surface, soit sur des sols riches en argiles gonflantes (vertisols, sols bruns tropicaux, etc.), soit sur des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles, fréquents dans le bassin méditerranéen.

Lors des orages de fin saison sèche, les eaux pénètrent dans ces sols fissurés jusqu'à la roche altérée, ruissellent dans ces fissures jusqu'en bas de pente où elles peuvent former des ravines régressives. Les fissures du sol dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique vont se transformer progressivement en tunnels, lesquels s'effondrent et forment des ravines régressives qui peuvent progresser de quelques dizaines de mètres au cours de grosses averses. Seul le labour en sec peut colmater ces fissures et forcer l'eau à mouiller toute la masse de sol sans s'infiltrer préférentiellement dans les méga porosités.



Photo 8 : le tunneling. Cliché Zékri N. Maghnia le 05/12/2017

Les ravines ne se développent pas toujours en relation avec l'abondance du ruissellement venant de l'amont : elles peuvent dépendre de l'appel au vide créé par le creusement d'une route ou d'une rivière ou de la pression de la nappe à l'endroit d'une source (ruissellement hypodermique). La différence de fonctionnement est importante mais il n'est pas toujours facile sur le terrain de l'observer, sauf un développement maximal à proximité de son origine située souvent en bas de pente, au niveau de la rivière ou d'une source. Seul ce type de ravine remontante est capable de couper une colline en deux, puisque l'origine est située en bas de versant. La tête de ravine est souvent plus profondément enfoncée dans le sol que les zones plus basses (car elle correspond à une sortie de la nappe temporaire suspendue) et il n'est pas rare de voir se succéder une série de ravines courtes, en cascade.

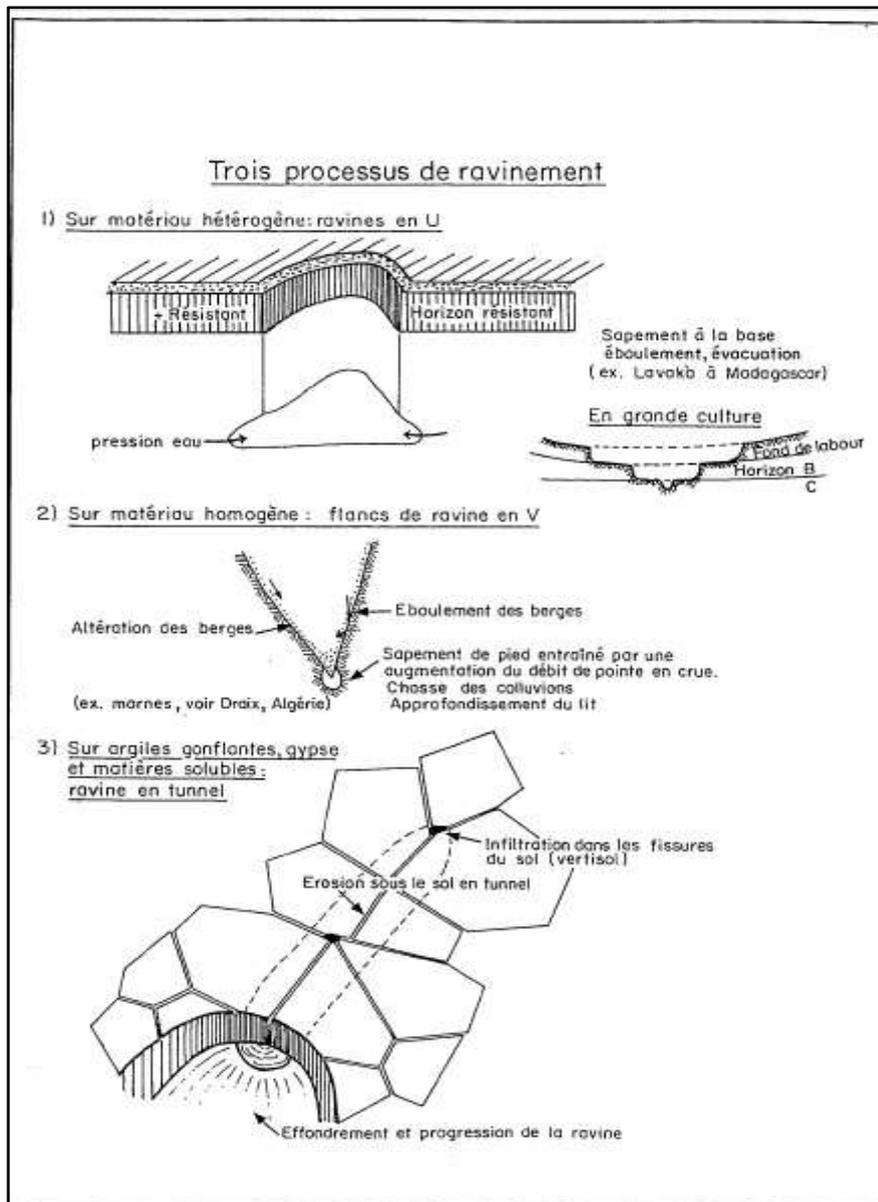


Figure 2 : typologie des ravines ; ravines en U (lavaka), en V, en tunnel (Roose, 1994)

2..4.3 EROSION EN MASSE OU MOUVEMENTS DE 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 (Roose et *al.* 2010). L'eau agit non pas par décapage mais par détérioration des qualités physiques en profondeur et peut provoquer des glissements de terrain.

Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux mais on peut les regrouper en cinq groupes principaux (Roose et *al.* 2010) :

- Les glissements lents : il s'agit d'un glissement plus ou moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement. Ce phénomène s'observe généralement sur les pentes fortes grâce à la forme couchée des jeunes plants forestiers et à la forme en crosse (partie recourbée) de la base des arbres adultes ;
- Les glissements rapides en planches : se 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 ;
- Les glissements rapides rotationnels ou en coups de cuillère : c'est où une masse de la couverture pédologique glisse en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contre-pente sur le versant. Il s'agit souvent de toute une série de coups de cuillère, laissant au paysage un aspect moutonné. La pente limite où se développent ces glissements rapides est de 40 à 60% ;
- Les coulées boueuses ou laves torrentielles : ce 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 supérieure à 1 m³ ;
- Les formes locales : ils s'agissent d'éboulements rocheux, de sapements de berges ou d'effondrements de versants qui entraînent des glissements localisés. Ceux-ci sont très fréquents en tête de ravine : ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure des lèvres d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive. On les retrouve également dans les oueds, en particulier dans les parties concaves de la rivière lorsqu'elle forme un méandre.

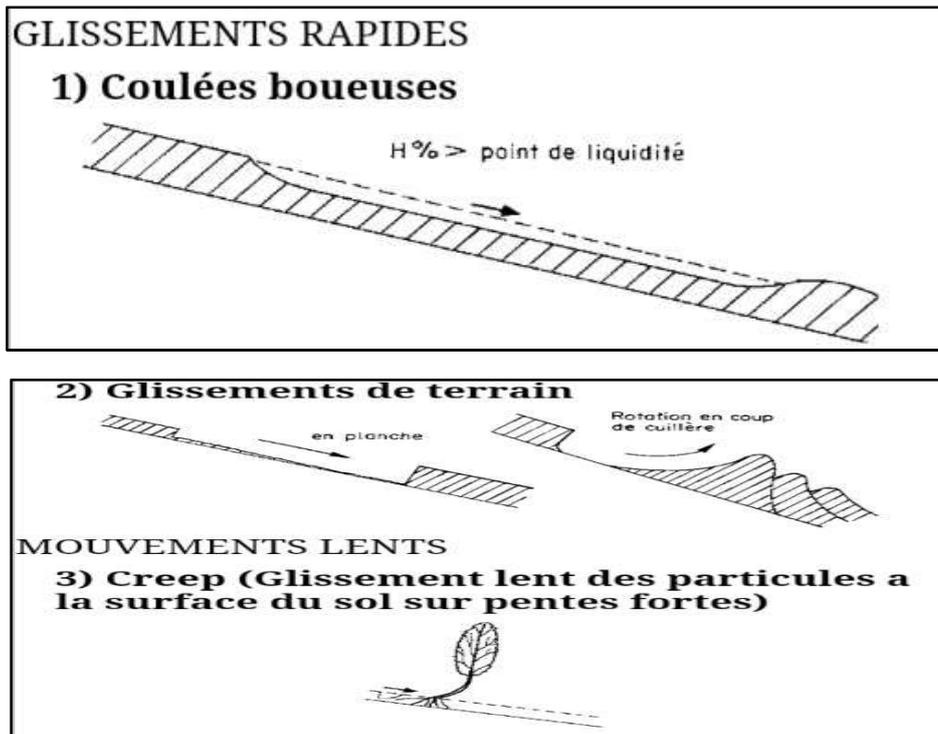


Figure 3 : diversité des formes de l'érosion en masse (Roose, 1994)



Photo 9 : sapement des berges. Cliché Bouci H. et Zékri N. Maghnia le 30/04/2011

Seul l'Etat dispose des moyens techniques, humains, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de glissement de terrain (Roose et *al.* 2010).

2.5 Rôle de la végétation dans l'atténuation des phénomènes érosifs

En parlant de l'érosion hydrique, on ne peut pas passer sans signaler le grand rôle du couvert végétal dans l'atténuation de l'effet de ces deux phénomènes sur le sol. L'érosion hydrique est en quelque sorte le résultat de la manifestation des précipitations sur la surface du sol. L'importance de cette manifestation est fonction en grande partie de la présence ou l'absence du couvert végétal.

2.5.1 ROLE DU COUVERT VEGETAL

- La végétation (couverture et architecture) peut réduire l'érosion par la protection des sols contre les agents érosifs et par leur fixation grâce à son système racinaire :

- Suivant sa hauteur et sa densité, la couverture végétale constitue un isolant régulateur de l'action des agents et phénomènes climatiques : précipitations, vents, température ;

- A l'égard des précipitations, le rôle du couvert végétal consiste dans une modification qualitative et quantitative de l'alimentation hydrique de la couche superficielle du sol. Il modifie la forme et la nature de l'eau qui arrive au sol après précipitation, et prolonge la durée de l'arrosage du sol longtemps après la fin de l'averse favorisant une importante infiltration ;

- Les racines ameublissent le sol et multiplient les possibilités de circulation interne (Benchetrit, 1972).

- La couverture végétale permet à la fois d'enrayer les processus d'érosion et de forcer les eaux de pluie, même celles des averses violentes, à pénétrer dans le sol et à réalimenter les nappes phréatiques et les sources.

- Cette action de la couverture végétale est tellement importante qu'elle peut masquer l'effet de la pente, c'est à dire que même sur pente forte (30 à 40%) l'érosion peut être nulle si le sol est couvert d'une prairie dense ou d'une forêt (Goujon, 1968).

- La forêt joue un rôle important dans la morpho dynamique des milieux qu'elle occupe. Elle diminue l'importance de certains processus d'érosion mécanique, tandis qu'elle joue un rôle décisif dans l'altération et la pédogenèse (Veyret, 1999).

- En région méditerranéenne, les formations forestières se montrent beaucoup plus efficaces pour lutter contre l'érosion que les formations arbustives ou herbacées (Duchaufour, 2001). Les couvertures végétales permanentes des boisements, des jachères et des cultures paillées sont infiniment plus efficaces que les cultures vivrières annuelles, bisannuelles ou même pérennes (Duchaufour et al, 1991).

- L'érosion varie de 292 à 356 kg / ha sous matorral à base de chêne vert (couverture végétale : 50 à 80%, cailloux : 48%) et de 1,9 à 2 t / ha sous matorral à base de diss (couverture végétale : 30 à 80 %, cailloux : 50 à 80%) (Mazour, 1992). Sous les garrigues méditerranéennes les pertes en terre sont très réduites ($E = 0,03$ à $0,04$ t/ha) du fait des litières et des végétations basses (Roose et *al*, 1997).

- La forêt est donc simultanément la barrière antiérosive et la pourvoyeuse d'eau les plus efficaces qui soient. Elle est aussi, et pour les mêmes raisons, le complément indispensable de tous les travaux de génie-civil effectués pour lutter contre les torrents et c'est elle encore qui protégera d'un trop rapide et catastrophique envasement les lacs de barrage construits en vue de l'irrigation, de la distribution d'eau potable ou de la production d'énergie hydroélectrique (Letreuch Belarouci, 1995).

2.5.2 INFLUENCE DE LA VEGETATION SUR LES PROCESSUS DE L'EROSION HYDRIQUE

Dans les processus de l'érosion hydrique (Splash et ruissellement), la végétation peut intervenir comme suit :

2.5.2.1 Sur le Splash

- La végétation protège le sol contre l'impact direct des gouttes de pluie (contre le choc direct de l'eau). Les eaux de pluie interceptées par le couvert végétal (grâce à sa partie aérienne) avant d'arriver au sol ont une hauteur de chute réduite, donc une énergie cinétique et un effet de destruction (Splash) moins importants. Henin et *al* (1969), affirme que la battance des sols ne se fait que si le terrain n'est pas couvert.

- Sous une forêt l'interception des eaux de pluies est fonction de la densité et de la structure du couvert forestier. Elle croît avec l'augmentation de la densité et de la surface terrière. Dans le cas d'une prairie cette interception peut être totale.

2.5.2.2 Sur le ruissellement

- La végétation peut permettre de réguler l'hydrologie des bassins versants. Cette régulation a pour effet de diminuer la quantité, l'intensité et la vitesse du ruissellement.

- Les écoulements qui causent le maximum des dégâts et des pertes dans notre espace utile peuvent être réduits de plus de 60% par « reverdissement » des bassins versants (Benabdeli et *al*, 1995).

- La végétation fixe par son feuillage, une certaine quantité d'eau de pluie qui s'évapore et ne contribue pas donc à l'augmentation du volume de ruissellement.
- Par son chevelu de racines et la matière végétale qui y est accumulée, elle forme un obstacle au ruissellement et permet de le freiner ou de l'étaler dans le temps.
- La végétation enrichie le sol en matières organiques, ce qui a pour effet d'améliorer sa structure et sa porosité et donc augmenter l'infiltration de l'eau et par conséquent diminuer le ruissellement.
- La végétation a également un effet d'écrêtage et d'étalement du ruissellement. Ainsi, sous une forêt, le ruissellement diminue et le temps d'écoulement de la pluie augmente jusqu'à 500 fois plus. La forêt réduit d'au moins 80% la pointe de crue, d'au moins 50% le volume ruisselé (Rey, 2001).
- Mais cette efficacité de la forêt est moindre pour les événements pluvieux longs ou abondants. Melvor et *al.* (1995), ont observé pour des pluies de plus de 100 mm avec une intensité supérieure à 45 mm/h, la végétation ne jouait pas un grand rôle dans la réduction du ruissellement (in Rey, 2001). Ces mêmes auteurs, ont avancé une valeur de 40% comme couverture végétale minimale à maintenir ou installer sur des terrains érodables pour une maîtrise significative de l'érosion. Cette couverture spatiale doit être aussi associée à une bonne répartition dans le temps.

2.6 L'ampleur de l'érosion hydrique dans l'Algérie septentrionale

L'Algérie septentrionale est la région la plus productive et la plus arrosée du pays, mais elle est fragile car menacée par plusieurs facteurs naturels (conditions hydro climatiques, physiques, géomorphologiques) favorisés et aggravés par des pratiques liées à l'homme (conditions socioéconomiques).

Dans ce cadre, il convient de citer le rôle de l'érosion hydrique dans la dégradation des sols et de la qualité des eaux de surface des bassins versants algériens ainsi que ces conséquences qui affectent durement le patrimoine foncier du pays.

L'érosion hydrique touche préférentiellement les massifs telliens. On estime à plus de 20 millions d'hectares de terres touchées par l'érosion particulièrement dans les zones montagneuses où sont implantés plus de 90% des barrages et où se concentrent environ 20 millions d'habitants (Mazour et Morsli , 2002). Elle affecte principalement les massifs du Tessala , de Béni-Chougrane , du Dahra, du Zaccar et de l'Ouarsenis.

Cette crise morphogénique est due à l'agressivité du climat. Les paysages méditerranéens peuvent rester stables pendant des années jusqu'à ce qu'une averse rare sature le sol et provoque des ravinements de 100 à 300 t/ ha/ jour, ou pire des glissements de terrain de plusieurs milliers de m³ de boue en une heure et des inondations brutales (Roose, 1999).

La régression du couvert végétal par l'action de l'homme (implantation d'habitations et des routes, surexploitation des milieux par le défrichement abusif et le surpâturage incontrôlé qui provoque l'imperméabilisation des surfaces du sol par le piétinement du bétail et des paysans, extension de cultures peu couvrantes sur des sols fragiles, pratiques culturelles inadaptées, etc.) est aussi un facteur déterminant.

Cette régression est encore aggravée par les incendies répétées lors de la guerre de libération et jusqu'à nos jours. Actuellement en Algérie les incendies ravagent annuellement des surfaces plus ou moins grandes. Taabni (1998), a noté qu'entre 20.000 et 30.000 hectares de surfaces de forêts et de matorral sont ravagés par les incendies chaque année.

Dans cet environnement fragile, l'érosion hydrique sous ces différentes formes est à l'origine de pertes en terres considérables. Les chercheurs de l'INRF et de l'ORSTOM ont mesuré des pertes en terre par érosion en nappe de 0.1 à 20 t/ha/an, 5 à 60 t/ha/an pour l'érosion mécanique sèche par les travaux cultureux motorisés et 90 à 300 t/ha/an pour le ravinement. Ainsi, l'érosion en nappe est modeste en Algérie, même sur forte pente, tandis que le ravinement et les mouvements de masse mobilisent des volumes considérables de terre (Roose et al, 2000).

Ces pertes en terres ont aussi des conséquences néfastes sur les infrastructures hydrauliques installées en aval des bassins versants. L'Algérie perd annuellement une capacité totale de stockage des eaux, estimée à 20 millions de m³ par le dépôt des sédiments dans les retenues (Remini, 2000). L'envasement des barrages est rapide, en 30 à 50 ans (Roose et al, 2000).

De point de vue dynamique érosive, la plus forte érosion est enregistrée dans la saison d'automne, période connue par les orages de courte durée et de forte intensité (surtout dans le mois de Septembre et Novembre). Les écoulements sont très chargés de sédiments et les apports solides dans cette saison représentent souvent plus de 50% des apports solides de l'année entière. Dans les saisons d'hiver et du printemps, caractérisées par des pluies plus

abondantes et durables, les transports liquides sont importants mais l'érosion reste faible (Zékri, 2003).

Selon Roose et *al.* (2010), 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.

En Algérie, l'érosivité des pluies n'est pas déterminante du risque érosif mais c'est plutôt la fragilité des terrains (pentes fortes, substrats tendres et couvert végétal dégradé) qui en est la cause majeure (Zékri, 2003).

3. LES MOYENS DE LUTTE CONTRE L'ÉROSION HYDRIQUE

La conservation de l'eau et du sol est un devoir de l'homme d'aujourd'hui envers les générations de demain. Il faut tenter par tous les moyens de favoriser la reconstitution des sols, empêcher leur dégradation, maîtriser les crues et assurer l'approvisionnement en eau.

Lutter contre l'érosion est une activité humaine qui date de la plus haute antiquité. Depuis 7000 ans l'homme accumule les traces de ses luttes pour maîtriser les diverses formes de l'érosion et améliorer la gestion de l'eau et de la fertilité des sols (Roose et *al.*, 1998).

Les anciennes sociétés rurales ont élaboré empiriquement des stratégies permettant de conserver les sols et de maintenir la productivité des terres, et plus récemment dans l'histoire et devant la multiplication de la population, les techniques traditionnelles qui ont été souvent très efficaces n'arrivent plus à répondre aux défis présents. C'est ainsi que d'autres techniques de protection et de conservation des eaux et des sols ont vu le jour.

3. 1 Les stratégies modernes

À l'occasion des graves crises sociales se sont développées des stratégies modernes d'équipement hydraulique des montagnes. Il s'agit essentiellement de reforestation des hautes vallées, d'améliorations foncières, de correction des torrents et ravins et de terrassement des

terres cultivées sur fortes pentes. La priorité a été donnée à la réalisation de gros chantiers de terrassement et de reforestation (Roose et *al*, 2010).

3.1.1 LA RESTAURATION DES TERRAINS DE MONTAGNE « RTM »

Elle a été développée en France à partir des années 1850, pour faire face à une crise d'érosion due aux populations montagnardes pauvres qui ne pouvaient survivre sans mener leurs troupeaux sur les terres communales déjà surpâturées. La dégradation des couvertures végétales et le tassement des sols par le bétail ont entraîné le développement catastrophique des torrents. Pour protéger les vallées aménagées et les voies de communication des masses de terre mobilisées par ceux-ci, l'Office national des forêts a racheté les terres dégradées, reconstitué la couverture végétale et corrigé le lit des torrents (Lilin ,1986). Seulement cette technique a connu des limites : des besoins monétaires très élevés, des travaux non adaptés aux terrains montagneux, moins efficaces et non rentables à court terme.

3.1.2. LA CONSERVATION DE L'EAU ET DES SOLS « CES »

Elle a été créé par Bennet « le père des conversationnistes » aux USA, lors de la terrible crise économique de 1930, pour conseiller les fermiers volontaires qui demandaient à l'état un appui technique et financier pour lutter contre l'érosion. En effet, l'extension rapide des cultures industrielles peu couvrantes (coton, arachide, maïs) dans la Grande Prairie a déclenché une érosion éolienne catastrophique : 20 % des terres cultivées furent dégradées par l'érosion à cette époque. Sous la pression de l'opinion publique, l'état a mit en place simultanément un programme de recherches et un service de CES au niveau de chaque comté (Roose et *al*, 2010). Mais malheureusement, malgré 50 ans de CES et des milliards de dollars investis, plus de 25 % des terres cultivées perdent encore plus de 12 t/ha/an de sédiments (Roose et *al*, 1998).

3.1.3. LA DEFENSE ET RESTAURATION DES SOLS « DRS »

Elle a été développée par les forestiers dans les années 1940-1980 autour du bassin méditerranéen. Il s'agit du mariage de raison entre les deux précédentes approches (la RTM et la CES) pour faire face à de graves pénuries d'eau, à l'envasement rapide des barrages et à la dégradation des équipements et des terres.

La DRS a été créée en Algérie par la loi du 02 Février 1941 et l'arrêté du 17 Mai 1941 (Seladji, 1993). Cette technique a employé trois types d'aménagements antiérosifs : les banquettes « SACCARDY » appropriées aux conditions locales, les ouvrages de correction torrentielle et le reboisement.

De 1946 à 1956, les banquettes ouvertes en Algérie faisaient deux fois le tour de la terre. En fin de 1964 plus de 375 000 ha avaient au total été traité en DRS (Greco, 1966) et depuis 1970 les réalisations de travaux de DRS sont passées de 14000 ha à une moyenne de 25 000 ha par an (Séminaire national sur les forêts et la lutte contre l'érosion, 1977).

Un des fondateurs du service de la conservation des sols aux Etats Unies, Monsieur Lowdermilk, a visité à plusieurs reprises l'Algérie où il a beaucoup estimé et encouragé le service de la DRS. Les techniques de la DRS algériennes ont essaimé en Tunisie, au Maroc, au Moyen Orient, en Yougoslavie, en Turquie, en Iran et en France (Greco, 1966).

Vers 1980, les pouvoirs publics se sont demandés où en était-on avec l'efficacité de la DRS. Cependant en 1986, l'Algérie après 40 années de travaux systématiques, lance un bilan national (Arabi et Aslaa, 1998). L'Institut National de Recherche Forestière « INRF » et l'administration des forêts en collaboration avec l'ORSTOM ont conjugué leurs efforts pour établir ce bilan et les résultats obtenus ont montré que sur 350 000 ha aménagés, 20 % de banquettes ont disparu, 50 % sont en mauvais état et sur le reste en bon état, il n'est pas prouvé que l'érosion soit un problème majeur (Roose et *al*, 1998). Depuis 1978 la construction des banquettes a été suspendue, suite aux critiques des chercheurs, au rejet des paysans et surtout aux difficultés économiques.

3.1.4. La GESTION CONSERVATOIRE DE L'EAU, DE LA BIOMASSE ET DE LA FERTILITE DU SOL « GCES »

Depuis 1986, des chercheurs ont développé une nouvelle stratégie pour répondre aux besoins essentiels des paysans : à savoir, valoriser la terre et le travail, augmenter les revenus des paysans, tout en améliorant le capital foncier et l'environnement rural. Cette stratégie a été appelée « Better land husbandry » (mieux soigner la terre) par les anglophones et GCES par les francophones (Roose et *al*, 2010).

Cette nouvelle stratégie fait intervenir des méthodes simples et connues dans la tradition paysanne, elle déborde largement les interventions classiques de la DRS et intègre la gestion intensive du système agro-sylvo-pastoral à l'échelle d'une communauté rurale (Roose, 1990).

Il a été prouvé, actuellement après plusieurs années de recherche, de travaux et de bilans que les techniques de conservation de l'eau et du sol ne peuvent être durables et efficaces que par l'intégration de la population locale ainsi que leurs intérêts.

3.2. Les procédés mécaniques et biologiques

Ils existent plusieurs techniques d'aménagements antiérosifs utilisées dans le monde, mais le contenu de cette partie rassemblera celles utilisées notamment en Algérie, et elles seront regroupées en deux types : mécanique et biologique.

3.2.1. LES PROCÉDES MECANIQUES

3.2.1.1 Les terrasses

La culture en terrasses est le plus ancien procédé de culture en montagne : les terrasses en gradins, 2000 ans avant J.-C. en Asie et les terrasses méditerranéennes sur murettes en pierres, 1000 ans après J.-C. en Crète (Roose et *al*, 2010). En Algérie, on les en trouve partout au Nord algérien datant de l'époque romaine ou plus récentes.

La technique est simple, les versants sont divisés en plateformes horizontales plus ou moins écartées les unes des autres. On travaille en déblai à l'amont de l'axe de la future terrasse et en remblai à l'aval de cet axe. Les terres de remblai sont soutenues à l'aval, soit par un mur de pierres sèches, soit par une pente gazonnée. Par ce procédé, en diminuant la pente, on diminue la vitesse des eaux du ruissellement mais on ne les supprime pas puisque elles descendent malgré tout, du haut en bas du versant.

3.2.1.2 Les murettes en pierres sèches

Une murette en pierres sèches est construite suivant les courbes de niveau, elle ne doit pas dépasser 60 cm de hauteur. Elle constitue à la fois un obstacle qui diminue la vitesse d'écoulement de l'eau sur la pente et un filtre qui retient les matériaux entraînés dans la zone comprise entre deux ouvrages. Elle se colmate peu à peu en amont. Lorsque l'atterrissement atteint le sommet de la murette, on relève son niveau par de nouvelles lignes de pierres. Il se

forme ainsi progressivement des terrasses en escaliers. Comme pour le cas des terrasses, l'érosion est ralentie mais non supprimée.



Photo 10 : versant divisé en terrasses cultivées par des arbres fruitiers et soutenues par des murettes.
Cliché Sahel A. et Zékri N. Béni Snous, Mai 2011



Photo 11 : versant divisé en terrasses cultivées par l'olivier et soutenues par des murettes.
Cliché Zékri N. Béni Snous 29/11/2023



Photo 12 : versant divisé en terrasses laissées en jachère. Cliché Salhi B., Trindji M. et Zékri N.
Béni Snous. Mai 2008



Photo 13 : versant divisé en terrasses cultivées par l'olivier soutenues par des cuvettes en demi-lune.
Cliché Zékri N. Béni Snous, 2010

3.2.1.3 Les cordons en pierres

Les cordons en pierres est une technique traditionnelle de conservation de l'eau et de sol, comme les terrasses et les murettes, c'est des pierres imbriquées installées d'une manière perpendiculaires à la pente. Soit d'une manière continue sous forme de lignes, soit d'une manière discontinue sous forme d'escalier. Leur rôle est de briser la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement et le dépôt des terres transportées à l'amont de chaque cordon.



Photo 14 et 15 : cordons en pierres continus et discontinus. Cliché Zékri N. Salhi B., et Trindji M.
Béni Snous. Mai 2008

3.2.1.4 Les banquettes

Ce sont des levées de terre de faible hauteur (0.50 m) établies selon les courbes de niveau, elles sont généralement plantées par des arbres permettant de valoriser les surfaces marginales, de fixer les ouvrages et améliorer l'infiltration. Elles sont des petites terrasses horizontales, perpendiculaires à la ligne de la plus grande pente, dans le but est de remodeler une parcelle. Les banquettes forment un obstacle à l'écoulement de l'eau, elles limitent donc l'érosion, brisent l'énergie du ruissellement et favorisent l'infiltration.

La différence entre la banquette et la terrasse réside dans la taille des plateformes, dans la première elles sont de taille régulière et dans la deuxième leur taille varie selon la pente de la topo séquence. Elles sont plus larges en bas des versants.

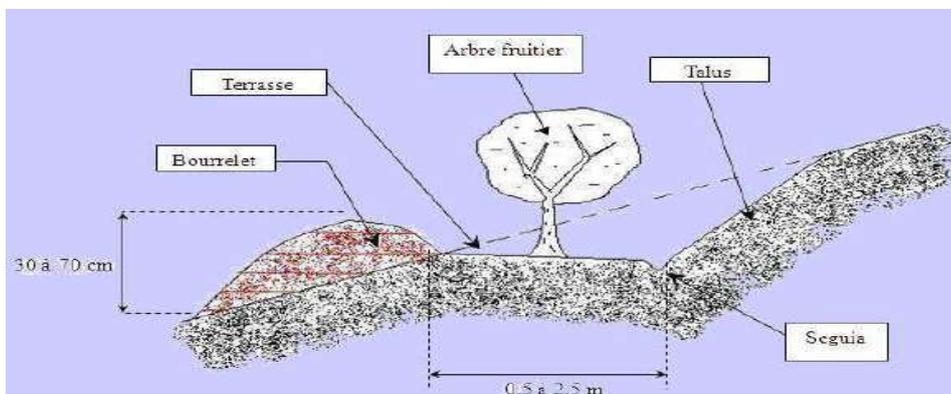


Figure 4 : Coupe transversale d'une banquette associée à un fruitier (www.ma.auf.org)



Photo 16 : banquettes végétalisées en très bon état.
Cliché Zaoui M. et Zékri N. Nedroma, 2009



Photo 17 : banquettes soutenues par le Pin d'Alep. Cliché Zékri N. Maghnia 05/12/2017

3.2.1.5 La correction torrentielle

La correction d'un cours d'eau ou d'une ravine comprend une succession de seuils destinés à diminuer la pente naturelle du lit, à briser la force du courant de crue et à sédimenter les apports solides (Arrignon, 1987). Ces seuils présentent généralement un déversoir dans leurs parties centrales et sont implantés en escalier. Cette disposition permet une dissipation de l'énergie des écoulements et conduit progressivement à une modification de la pente du talweg évoluant théoriquement à long terme vers la pente d'équilibre du torrent caractérisé par la disparition de tout phénomène d'arrachement et de dépôt (Benyamina, 1996).

- Règle générale : lorsqu'il s'agira de corriger la pente de torrents, on prendra bien soin d'intervenir de l'amont vers l'aval et ceci pour les raisons suivantes :
 - En tête de bassins versants les zones drainées sont réduites, les débits véhiculés sont inférieurs à ceux rencontrés à l'exutoire aval ;
 - Les aménagements de tête rendent plus maniables les débits à l'aval et par la suite, ont une conséquence directe sur le dimensionnement des seuils.

- Les moyens de lutte contre le ravinement sont :
 - Construction de petits seuils horizontaux avec des matériaux existant sur place ;
 - Stabilisation des berges et pentes de ravin par des petits ouvrages de fixation temporaire ;
 - Complantation des berges et pentes avec des végétaux à fort enracinement ;

- Création de barrages successifs entraînant la dissipation de l'énergie de l'eau ;
- Construction de bassins de décantation et de rétention des sédiments venant de l'amont ;
- L'accroissement de la rugosité des fonds et berges des ravins de manière à freiner la puissance du flot.

3.2.1.5.1 Les seuils de correction torrentielle utilisés en Algérie

3.2.1.5.1.1 Les gasons

Le gabion est une cage ayant la forme d'un parallélépipède rectangle en grillage galvanisé, remplie de pierres soigneusement rangées. On distingue les gabions cages qui servent de constituer le corps des ouvrages et les gabions semelles qui servent à constituer des massifs de fondations susceptibles de subir des déformations.

Tableau 1 : dimensions usuelles des gabions (Leblond et Guerin, 1984)

Type	Longueur (m)	Largeur (m)	Hauteur (m)
Gabions semelles	2	1	0.5
	3	1	0.5
	4	1	0.5
	5	1	0.5
	6	1	0.5
Gabions cages	2	1	0.5
	3	1	0.5
	4	1	0.5
	5	1	0.5
	6	1	0.5

En chantier, les gabions sont assemblés et relier régulièrement et soigneusement les uns aux autres avec un fil de ligature, les pierres ne doivent pas être friables, ni gélifiées, ni poreuses et de dimension plus grande que celle de la maille de grillage.

Les mailles sont de forme hexagonale et peuvent avoir les dimensions suivantes : 100mm/120mm (la plus utilisée), 80mm/110mm (moins utilisée), 45mm/65mm (n'est pratiquement plus utilisée). Un gabion à mailles 80/110 est plus lourd qu'un gabion à mailles 100/120, car le premier a 22% de fils de plus que le second. Les gabions à mailles double

torsion sont plus adoptés et recommandés par les constructeurs que les gabions à mailles simple torsion (Leblond et Guerin, 1984).

Les pierres au contact des mailles devront avoir une grandeur dans tous les sens au moins égale à 1.5 fois la grosseur des mailles et pour assurer la finition du remplissage il faut éviter de terminer par des petites pierres ou des pierres plates.

Les pierres doivent être composé de matériaux durs qui sont par ordre de préférence des :

- 1- roches éruptives (granites et granitoïdes) ;
- 2- roches sédimentaires (quartzites, grès, latérite, calcaire)
- 3- pierres artificielles (briques cuites, blocs de béton)

Les principales phases de construction d'un gabion sont :

- Terrassement d'assiette
- Pose des gabions semelles de fondation
- Pose des rangées successives des gabions cages
- Remblayage éventuel des vides existant entre le talus et les gabions.



Photo 18 : Seuil en gabion avec un déversoir* de forme trapézoïdale.

Cliché Zékri N. Maghnia 05/12/2017

3.2.1.5.1.2 Les seuils en pierres sèches

Les seuils en pierres sèches sont des imbrications de pierres sans liants. Ils sont employés pour les petites et moyennes ravines sur des pentes faibles et lorsque le matériau est en quantité suffisante. Ils ne devront jamais dépasser les 3 m de hauteur et jamais établis dans les terrains argileux (Leblond et Guerin, 1984).

Il vaut mieux éviter dans la construction de ce type de seuil, les pierres plates et rondes ainsi que les matériaux de rivière car ils échappent facilement du mur du barrage. Le diamètre des pierres en règle générale ne doit pas être inférieur à 10 cm et 25 pour cent de l'ensemble des pierres doit entrer dans la catégorie 10-14 cm. La limite supérieure dépendra de la taille du barrage (Burchard, 1980).

Les principales phases de construction d'un seuil en pierres sèches sont :

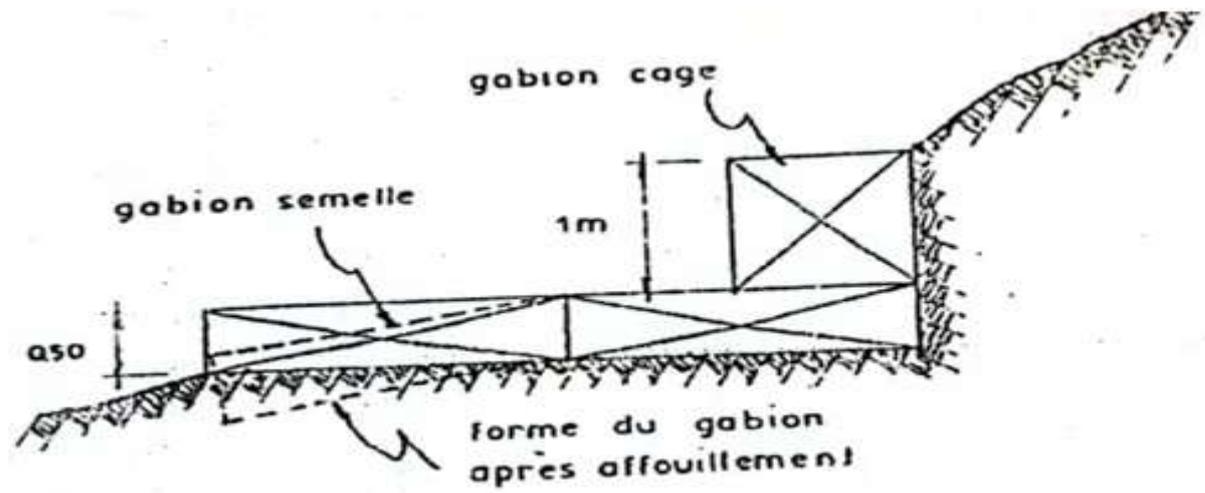
- Les pierres sont posées à leur grande longueur dans le sens du courant ;
- Les cuvettes du déversoir* seront curvilignes de préférence ;
- Le fruit sera de 15 % à 25 % ;
- Les dimensions des seuils seront variables en fonction de la largeur et de la profondeur des talwegs.



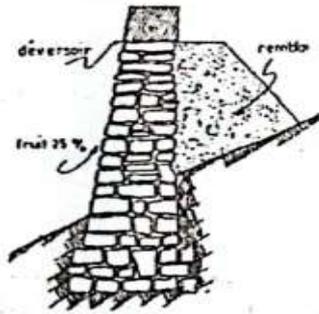
Photo 19 : Seuil en pierres sèches avec un déversoir* de forme trapézoïdale.

Cliché Zékri N. Maghnia 05/12/2017

(*) Le déversoir est la partie du barrage par où s'écoulera l'eau du torrent : c'est le seuil. Ce seuil peut avoir une section longitudinale rectangulaire, trapézoïdale ou curviligne. Les déversoirs à section curviligne sont préférable parce qu'ils ont l'avantage d'éviter les angles et de combattre la convexité des dépôts de matériaux contrairement aux déversoirs à section rectangulaire ou trapézoïdale qui ont des angles qui peuvent être attaqués par les matériaux et présentent aussi le risque de provoquer des affouillements (Greco, 1966).



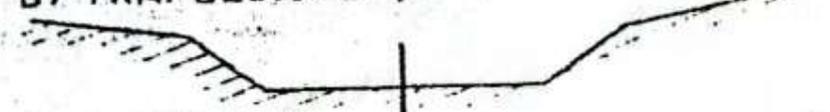
(1) : Vue de face



A) RECTANGULAIRE



B) TRAPEZOÏDAL



C) CURVILIGNE



Figure 5 : schémas d'un seuil en gabion, seuil en pierres sèches et les différentes formes du déversoir



Photo 20 : Seuil en pierres sèches avec un déversoir de forme curviligne.

Cliché Zékri N. Maghnia, Mai 2000

En cas de forts débits de pointe aux niveaux des ravines, qui occasionnent des fortes érosions et des inondations, les pierres sèches peuvent être liées avec du béton. L'évacuation des eaux au niveau des seuils se fera à travers des petites fenêtres et le surplus de la crue à travers un déversoir renforcé aussi par du béton.



Photo 21 : seuil en pierres sèches, renforcé par du béton.

Cliché Zékri N. Vallée d'El Ourika. Marrakech, Mai 2009

3.2.1.5.1.3 Les seuils en terre

Ils sont construits à partir de matériaux terreux (sable et argile) et formés par des couches damées de moins de 15 cm d'épaisseur chacune. Pour leur caractéristique de facilité et de

simplicité d'exécution, est le premier type d'œuvres à prendre en considération lorsqu'on veut aménager un torrent.

En Algérie les seuils en terre sont souvent installés sur le cours d'eau principal du bassin versant, pour un double but : lutte antiérosive et collette d'eau. La technique utilisée est simple : un remblai est levé au niveau du site choisi, renforcé pour des raisons de stabilité par un déversoir cimenté dans sa partie centrale.



Photo 22 : seuil en terre avec un déversoir cimenté.
Vue aval. Cliché Zékri N. Magnia11/12/2012



Photo 23 : seuil en terre avec un déversoir cimenté.
Vue amont. Cliché Zékri N. Magnia11/12/2012

3.2.1.5.1.4 Les seuils en pneus usagers

Le choix de ce type de seuil pour traiter certaines ravines est une décision intelligente, le fait qu'ils sont peu coûteux et très facile à réaliser. Mais du point de vue esthétique, le fait de les voir dans un paysage naturel, ils ne sont pas trop plaisant à l'œil.

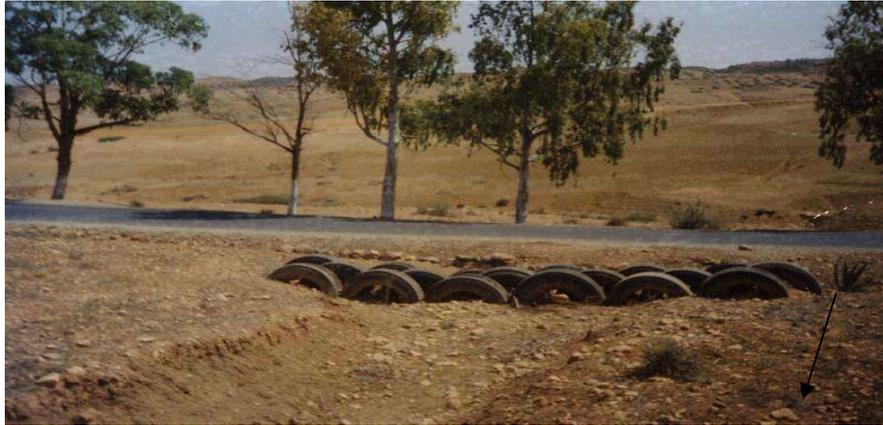


Photo 24 : seuil en pneus usagers. Cliché Zékri N., Maghnia, Mai 2000

3.2.1.5.2 Phases d'exécution des travaux de correction torrentielle

3.2.1.5.2.1 Piquetage des emplacements des seuils

Le piquetage se fera d'amont en aval, la distance entre les seuils est en fonction de la pente et aura une dénivelée qui pourra augmenter ou diminuer en fonction du relief de l'impact où on va asseoir le seuil. Le seuil doit être déterminé de telle sorte à ce que la pente entre le pied du seuil amont et le sommet du seuil aval soit proche de zéro : c'est la pente de compensation. C'est la pente pour laquelle la quantité de matériaux enlevés par le torrent correspond à la quantité de matériaux apportés, elle s'appelle aussi «pente limite» (Greco, 1966).

L'écartement entre les seuils dépend des gradients des dépôts sédimentaires qui devraient accumuler en amont des barrages, de la hauteur effective des barrages, des crédits disponibles et du but recherché en ce qui concerne le traitement de la ravine (Burchard, 1980). Normalement quand, on se fixe pour objectif la lutte contre le ravinement, il faut que la distance entre les barrages de consolidation soit suffisamment importante pour que l'on puisse utiliser à plein la capacité de rétention de sédiment des ouvrages. Mais aussi des ouvrages trop espacés permettant aux eaux de s'organiser et d'atteindre des vitesses importantes susceptibles d'endommager les seuils.

Pour calculer l'écartement la formule souvent utilisée en Algérie est celle donnée par (Greco, 1966), la formule est la suivante :

$$E = \frac{L}{N} \begin{cases} E : \text{écartement} \\ L : \text{longueur du ravin} \\ N : \text{nombre de seuil} \end{cases}$$

En Haïti, Régis et Roy (1999) ont conseillé un écartement entre les seuils selon la pente comme suit :

Pente	Ecartement conseillé
<10 %	12 à 15 m
10 à 15 %	10 à 12 m
25 à 40 %	8 à 10 m
40 à 60 %	6 à 8 m
> 60%	Environ 5 m

Pour déterminer le nombre de seuils à planter, la formule couramment utilisée en Algérie est la suivante :
$$N = L \frac{(P - I)}{H}$$

Où : N : Nombre de seuils, L : Longueur du ravin, P : Pente moyenne du lit, I : Pente de compensation déterminée expérimentalement, H : Hauteur moyenne des lits.

3.2.1.5.2.2 Fondation des seuils

Les fondations sont les éléments essentiels des ouvrages, car elles évitent le déchaussement et l'emportement des seuils par les eaux en période de pointe. Selon Nahal (1975), la base des ouvrages de correction torrentielle doit pénétrer loin en profondeur et dans les berges du ravin pour empêcher les pertes par dessous et aux deux extrémités. Ces fondations seront ouvertes en travers du chenal et ont pour dimension de 0.55 à 0.75 m de profondeur et jusqu'à 1m dans les sols affouillables.

Elles doivent avoir une largeur supérieure à celle de la base de l'ouvrage et dépasser d'une valeur sensiblement égale à l'amont et à l'aval : 0.20 m à 0.30 m de sur largeur en largeur environ (Greco, 1966).

3.2.1.5.2.3 Ancrage des seuils

Le fait d'ancrer un barrage de consolidation dans les talus latéraux et le fond de la ravine renforce considérablement la stabilité de l'ouvrage. Il est important dans les ravines où l'on peut s'attendre à gros débits de pointe et où les sols sont fortement sujets à l'érosion, car il diminue le danger d'affouillement et de minage autour des barrages et allonge considérablement le chemin parcouru par les infiltrations.

Les ancrages se composent d'une tranchée de 0.6 m de profondeur et de largeur creusée en travers du chenal .En cas d'une instabilité excessive, la profondeur de la tranchée est portée à 1,2 ou 1,8 m (Burchard, 1980).



Photo 25 et 26 : seuil en pneus usagers déstabilisé à cause d'une mauvaise fondation (à gauche) et d'un mauvais ancrage et déclenchement du phénomène de renardage (à droite). Cliché Zékri N. Maghnia 11/12/2012



Photo 27 : seuil en pierres sèches déstabilisé à cause d'une mauvaise fondation et déclenchement de l'érosion régressive.

Photo 28 : seuil en gabions déstabilisé à cause d'une mauvaise fondation et déclenchement de l'érosion régressive.

Clichés Boucif H. et Zékri N. Maghnia le 30/04/2011

3.2.2 LES PROCEDES BIOLOGIQUES

La lutte contre l'érosion par des végétations herbacées et ligneuses représente aujourd'hui un défi majeur sur les espaces où se localisent des enjeux socio-économiques. Ce sont des combinaisons de techniques de l'aménagement agricole, pastoral et forestier. Elles permettent de mettre en place le couvert végétal avec des méthodes de bonne gestion des terres réduisant au maximum leur érosion.

3.2.2.1 Le mulching

Il vient du mot anglo-saxon « mulch », signifiant couche superficielle formant écran. Il empêche l'évaporation et l'action néfaste des pluies et l'érosion en nappe. Cet écran peut être naturel : débris de plantes comme la paille (paillage) ou artificiel (sarclage et épierreage).

3.2.2.2 Les haies vives ou mortes

Les haies vives sont des alignements d'arbres et/ou arbustes naturels ou artificiellement plantés. Elles peuvent être denses ou lâches et avoir plusieurs objectifs en même temps : marquer une limite de propriété, produire du bois de feu et de service, du fourrage et des fruits et fixer la terre. Elles constituent aussi un réservoir de diversité biologique (nids d'oiseaux, graines, etc.). Les haies mortes sont aussi très efficaces dans la lutte érosive et dans la protection et la délimitation des champs de culture.



Photo 29 : haie morte à base de Jujubier.

Cliché Zékri N., Salhi B. et Trindji M. Béni Snous, Mai 2008

3.2.2.3 La culture selon les courbes de niveau

Il s'agit simplement d'orienter les techniques culturales selon les courbes de niveau, perpendiculairement à la pente, de telle sorte de ralentir au maximum la nappe d'eau ruisseler. D'après Wischmeier et Smith (1978), ce procédé est efficace sur des pentes ne dépassant pas 5% et sur des sols suffisamment perméables. Si les pentes sont plus fortes et les sols imperméables, il faut recourir en plus aux cultures en bandes alternées.

Les effets antiérosifs du labour selon les courbes de niveau sont remarquables : conserver l'eau, lutter contre l'érosion, diminuer le temps de travail et la consommation de carburant et augmenter les rendements, comme indiquent les tableaux suivants :

Tableau 2 : pertes d'eau et de terre d'un sol planté en maïs dans le sens de la pente ou selon les courbes de niveau (Nahal, 1975)

Pente %	Perte de terre en tonnes/ ha	
	Sillons le long de la plus grande pente	Sillons selon les courbes de niveau
5	1,28	0,47
10	6,23	3,32
15	9,88	5,71
20	13,56	7,54

Tableau 3 : économie de temps et de carburant lors de travail selon les courbes de niveau (Nahal, 1975)

Temps en heures/ha		Combustible en litres/ha	
Parcelles à sillons selon les courbes de niveau	Parcelles à sillons le long de la plus grande pente	Parcelles à sillons selon les courbes de niveau	Parcelles à sillons le long de la plus grande pente
5h13	5h44	27,41	36,81



Photo 30 : culture selon les courbes de niveau.

Cliché Zékri N., Salhi B. et Trindji M. Béni Snous, Mai 2008

3.2.2.4 La culture en bandes alternantes

C'est une culture qui s'effectue selon les courbes de niveau mais dans laquelle on fait alterner des bandes de cultures différentes, de façons à augmenter les obstacles au ruissellement. On peut ainsi cultivée les pentes jusqu'à 10% si le sol est sensible à l'érosion, peu perméable et le climat agressif (type méditerranéen), et les pentes jusqu'à 20% si le sol est bien drainé, peu sensible à l'érosion et le climat peu agressif. Les largeurs des bandes recommandées sont comme suit (Soltner, 1992) :

Tableau 4 : largeurs recommandées des bandes alternées, selon la pente et la violence des pluies
(D'après Gustason in Soltner, 1992)

Pente en %	Sols bien drainés résistants à l'érosion	Sols moyennement drainés et moyennement résistants à l'érosion	Sols mal drainés très sensibles à l'érosion
	Pluies peu érosives	Pluies érosives et très érosives	
3	42 m	34 m	26 m
5	38	30	24
8	34	26	21
10	30	24	16
12	27	21	
15	24	16	
17	21		
20	16		

La culture en bandes alternantes est l'un des procédés biologiques les plus efficaces de la conservation des sols. Techniquement dans les faibles pentes du Tell Algérien, le système est acceptable surtout si une bande sur deux est enherbée. Dans les régions les plus sèches on pourrait se contenter d'une bande en jachère avec mulch de chaume, la suivante en céréale ou en culture fourragère.

3.2.2.5 Le reboisement

Boiser, reboiser c'est créer ou recréer ici et là des boisements de production à grand rendement, partout de protection contre l'érosion hydraulique ou éolienne. De toute façon, c'est installer un végétal ligneux, le cultiver, l'élever afin d'obtenir du sol le maximum de profit (Greco, 1966).

Les essences de reboisement, quelle que soit leur origine, doivent réunir un certain nombre de qualités: être adapté au sol et au climat de la station où l'on veut les introduire, avoir des graines abondantes, présenter une bonne reprise à la transplantation, avoir une croissance rapide et donner des produits utiles. Parmi les essences de reboisements les plus utilisées en Algérie on cite :

- Les résineux : le Pin d'Alep (*Pinus halepensis*), le Thuya de barbarie (*Tetraclinis articulata*), le Cyprès toujours vert (*Cupressus sempervirens*), les Eucalyptus (*Eucalyptus globulus*), le Genévrier (*Juniperus phoenicea*), etc. ;
- Les feuillus : le Chêne liège (*Quercus suber*), le Chêne vert (*Quercus ilex*), le Peuplier blanc (*Populus alba*), le Peuplier noir (*Populus nigra*), etc.



Photo 31 : forêt de Tamakssal à base de Pin d'Alep et d'Eucalyptus, reboisée en amont d'un bassin versant pour la lutte antiérosive, en 1964. Cliché Zékri N. 05/12/2017.

3.2.2.5 La plantation fruitière

Le choix des essences fruitières doit se faire en fonction des exigences agro climatiques des espèces et des vœux des riverains. Les espèces proposées en priorité pour traiter les pentes des collines et des montagnes contre l'érosion sont les espèces rustiques telles que : l'olivier (*Olea europea*), l'amandier (*Amygdalus communis*), la vigne (*Phylloxera vasterix*), etc.

3.2.2.6 La fixation des berges

La fixation des berges consiste à protéger efficacement les barrages contre les affouillements. Elle est nécessaire lorsque les matériaux qui constituent la berge ont peu de cohésion, la vitesse d'écoulement des eaux est forte et la stabilité des talus est menacée.

Elle se fait soit par la végétation : cette opération consiste à laisser croître la végétation naturelle en la protégeant contre les déprédations du bétail, les feux et autres éléments nuisibles. Si la végétation naturelle ne suffit pas à recouvrir les berges d'une végétation suffisamment dense, on doit avoir recours à de nouvelles plantations. Les espèces souvent plantées pour la fixation des berges en Algérie sont : l'Atriplex (*Atriplex halimus*), l'agave américaine (*Agave sisalana*), le Cactus (*Opuntia ficus indica*).

Soit d'autres moyens sont utilisés qui dépendent essentiellement des disponibilités locales et peuvent être par exemple (Leblond et Guérin, 1984) :

- Des branchages ou des réseaux posés sur la berge et ancrés par des piquets ;
- Des piquets d'ancrage garnis de fil de fer ;
- Des jacks ou perroquets qui sont des troncs d'arbres disposés en faisceaux bloqués à leur base par des pierres et retenus par une chaîne des palissades en bois avec clayonnage ;
- Des enrochements déposés en vrac sur la berge. Ils comblent immédiatement tout affouillement et assurent ainsi une excellente protection ;
- Des fascines qui délimitent des cases remplies d'enrochement. Elles sont implantées suivent les courbes de niveau avec des piquets de bois fraîchement coupés qui amorcent la végétation arbustive des talus.



Photo 32 : berges couvertes par la végétation naturelle (Jujubier et Armoise blanche)
Cliché Boucif H. et Zékri N. Maghnia 30/04/2011



Photo 33 : berge fixée par la plantation d'Agave américaine. Cliché Zékri N. Maghnia 05/12/ 2017

3.2.2.7 Les cordons végétaux

Les cordons végétaux ont presque le même rôle que la fixation des berges, mais le végétal utilisé est planté dans l'amont des versants, sous forme d'un cordon, selon les courbes de niveau. Ils permettent de briser la vitesse d'écoulement des eaux, de minimiser l'érosion et protéger ainsi les ouvrages situés en aval.



Photo 34 : cordons végétaux plantés par l'agave américaine selon les courbes de niveau.

Cliché Zékri N. Maghnia 11/12/2012

Annexe : Autres ouvrages de lutte antiérosive utilisés dans le monde



Nappes en fer



Écran pare-blocs en filet de type Turner



Râteliers pare-avalanches



Seuils en filet de fer



Fascines en branches



Seuil en filet de fer renforcé par des piquets en bois



Seuil en béton



Seuil en piquets en bois et en fer



Gabion en bois



Ouvrage métallique préfabriqué

Références bibliographiques

- ARABI M. et ASLAA T., 1998. Etats de dégradation des banquettes dans le massif central de Kabylie (Algérie). Bull. Réseau-Erosion n°18, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 364-366.
- ARRIGHON J., 1987. Agro-écologie des zones arides et subhumides. Ed. G.-P, Maisonneuve et Larose .Paris
- BELMAHI M-N., 1998. Le littoral d'El Maleh – Erosion et aménagement. Mém. Mag., Inst. Geog. Amég. Terri., Univ. Sénia, Oran, 176 p.
- BENABDELI K., MEDERBEL K., MOHAMMEDI H., 1995. Environnement écologique et gestion intégrée des ressources hydriques. Comm. 2^{ème} Coll. Climat-Environnement, A.R.C.E., Oran, pp 24 -25.
- BENCHETRIT M., 1972. L'érosion actuelle et ses conséquences sur l'aménagement en Algérie. Ed. Presses universitaires de France, Paris, 216 p.
- BENYAMINA K., 1996. Mise en valeur intégrée et lutte contre l'érosion par la correction torrentielle et son impact socio-économique. Communication, 17p.
- BOIFFIN J., 1984. La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse Doc., I.N.A., Paris-Pignon, 320 p.
- BURCHARD H., 1980. Ouvrages et méthodes de correction de ravins. Ed. F.A.O., Etats-Unis, pp 219-265.
- CHEBBANI R., DJILLI K. et ROOSE E., 1999. Etude à différentes échelles des risques d'érosion dans le bassin versant de l'Isser. Bull. Réseau - Erosion n°17, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 85- 95.
- DEJELLOUL-SMIR S. et CHIALI S., 1991. Contribution à l'étude de l'érosion dans le bassin versant de l'Isser – Erodabilité du sol. Mém. Ing. Hyd., Univ. Tlemcen, 65 p.
- DUCHAUFOR P., 2001. Introduction à la science du sol. Ed. Dunod, Paris, 331 p.
- DUCHAUFOR H., BIZIMANA M., BITOKI O. et GUIZOL P., 1991. Bilan de dix ans de recherche E. et R. sur parcelles et bassin versant au Burundi. Bull. Réseau – Erosion n°11, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 36 - 37.
- HENIN S., GRAS R. et MONNIER G., 1969. Le profil cultural, l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Ed. Masson et C^{ie} éditeurs, 332 p (pp 109-114).
- HJULSTROM F., 1935. Studies on the morphological activities of rivers as illustrated by the river Fyries. Bull. GEO, Inst. Univ. Uppsala 25, 452 p.
- GOUJON P., 1968. Conservation des sols en Afrique et à Madagascar – Les facteurs de l'érosion et l'équation universelle de Wischmeier. Rev. Bois For. Trop. n°118, Nogent sur marne cedex, pp 3 - 17.
- KERTESZ A., 2000. Erosion des versants et transports solides à l'exutoire d'un bassin versant en Hongrie. Bull. Réseau - Erosion n° 20, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 104 – 109.
- LAOUINA A., 1998. Dégradation des terres dans la région méditerranéenne du Maghreb. Bull. Réseau – Erosion n° 18, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 33-53.
- LEBLOND B. et GHERIN L., 1984. Travaux de conservation des sols : étude des projets et leur réalisation par des techniques à haute intensité de main d'œuvre. Ed. PNUD-OIT/81/044, Genève, 223 p (pp 4 – 26).
- LETREUCH BELAROUCI N. 1995. Réflexion autour du développement forestier. Ed. O.P.U., Alger, 50 p.
- LILIN C., 1986. Histoire de la restauration des terrains en montagne. Cah. ORSTOM Pédol., 22 : 139- 146.

MARTIN C., BEGUIN E. et LEVANT M., 1997. L'érosion hydrique après incendie de forêt dans le bassin versant du Rimbaud (Var, France) : relations avec l'agressivité des précipitations. Bull. Réseau – Erosion n° 17, Ed. IRD (ex. Orstom), Montpellier, pp 83 - 92.

MAZOUR M., MORSLI B., 2002. L'impact combiné de la couverture végétale et de l'érosion sur l'infiltration et l'érodabilité du sol en parcelles expérimentales (type Wischmeier) dans les bassins versants du Nord-Ouest algérien. Bull. Réseau – Erosion n° 22, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp – .

MAZOUR M., 1992. Les facteurs de risques de l'érosion en nappe dans le bassin versant de l'Isser – Tlemcen – Algérie. Bull. Réseau – Erosion n° 12, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 300-313.

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT et GTZ, 2000 : Rapport sur l'état et l'avenir de l'environnement. 118 p.

MOUZAI L., 1987: Etude expérimentale de quelques relations pluie - érosion à l'aide d'un simulateur de pluie. Mém. Ing. Agro., INA, Alger, 43 p.

NAHAL I., 1975. Principes de conservation du sol. Ed., Masson, Paris, 143 p.

NSABIMANA S., 1999. Etude quantitative de l'érosion hydrique en milieu rural du Burundi. Bull. Réseau – Erosion n° 19, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 417-426.

ORTOLLI N.-A., MAURER C., 2000. Evaluation et localisation des risques d'érosion en zone agricole dans une réserve (Makiling Forest) aux Philippines. Bull. Réseau – Erosion n° 20, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 357 – 370.

POESSEN J., 1984. The influence of slope angle on infiltration rate and orntonian overland flow of volume, Z. Geomorph., N.F., supp-Bd, n° 49, pp 117-131.

REMINI B., 2000. L'envasement des barrages – quelques exemples algériens. Bull. Réseau – Erosion n° 20, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 165 – 171.

REY F., 2001. Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du Sud. Thèse Doc., Univ. JOSEPH FOURIER. Grenoble.

ROOSE E., SABIR M. et LAOUINA A., 2010. Gestion durable de l'eau et des sols au Maroc : valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes. Ed. IRD, Marseille, 343 p.

ROOSE E., CHEBBANI R. et BOUROUGAA L., 2000. Ravinement en Algérie – Typologie, facteurs de contrôle, quantification et réhabilitation. Bull. Réseau – Erosion n° 19, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 122 – 136.

ROOSE E., 1999. Evolution historique des stratégies de lutte antiérosive vers la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols : (GCES). Bull. Réseau – Erosion n° 19, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 11– 24.

ROOSE E., DE NONI G. et LAMACHERE J.M., 1998. L'érosion à l'O.R.S.T.O.M. – 40 ans de recherches multidisciplinaires. Bull. Réseau – Erosion n° 18, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 54 - 66.

ROOSE E., ARABI M., BRAHAMIA K., CHEBBANI R., MAZOUR M. et MORSLI B., 1997. Recherches sur la réduction des risques d'érosion par la GCES en moyenne montagne méditerranéenne algérienne. Bull. Réseau – Erosion n° 17, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 161- 167.

ROOSE E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. Bulletin pédologique de la FAO, 70 p.

ROOSE E., 1993. Water and soil fertility management – A new approach tee fight erosion and improve land productivity, in Acceptance of soil and water conservation strategies and technologies. DISTL, Witzzenhausen, RCA, pp 129-164.

ROOSE E. et FAUCK R.-E., 1981 : Des contraintes d'origine climatiques limitent l'exploitation des sols ferrallitiques dans les régions tropicales humides de Cote d'Ivoire. Cah. ORSTOM., série pédologique, vol. XVIII, n° 02, pp 153-157. (Source Internet).

RUIZ FIGUEROA J.F. et VALENTIN C.,1983. Effects of various types of cover on soil detachment by rainfall. Ed. ORSTOM, Abidjan, 17 p.

TAABNI M., 1998. Aménagement, lutte contre l'érosion des terres et pratiques paysannes dans les montagnes telliennes du Nord-Ouest algérien. Bull. Réseau – Erosion n° 18, Ed. IRD (Ex. ORSTOM), Montpellier, pp 348 - 363.

TALBI O., 1997. Apports des systèmes d'informations géographiques au suivi et à la quantification de l'érosion hydrique par l'équation universelle des pertes de sol (USLE) : application au bassin versant de l'Isser (Tlemcen). Mém. Mag., C.N.T.S. (Centre national des techniques spatiales), 95 p.

SELADJI A., 1993. Contribution à la cartographie d'un micro-bassin versant d'Ain Nekrouf, application d'une nouvelle stratégie de conservation de l'eau et du sol. Mém. Ing. Inst. Forest., Univ. Tlemcen, 99p.

SOLTNER D., 1999. Les bases de la production végétale. Tome 3 (La plante et son amélioration). Collection : Sciences et techniques agricoles, 304 p.

VEYRET Y., 1999. Les milieux forestiers – Aspects géographiques (Géomorphologie et forêt). Ed. SEDES, dossier n° 25, pp 66-86.

VIANI J.-P., 1986 : Contribution à l'étude expérimentale de l'érosion hydrique. Thèse Doc. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 239 p.

WISCHEMEIER W.H. et SMITH, 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. U.S Dép. Agri., n° 537, 58 p.

ZEKRI N. et TOUNKOB A. (2021). Cartographie de la vulnérabilité potentielle des sols à l'érosion hydrique dans le bassin versant de la Tafna (Nord Ouest Algérien). Rev. Mar. Sci. Agron. Vét. 9(4), pp 608-615.

ZEKRI N., 2017. Analyse du facteur d'agressivité climatique et son influence sur l'érosion et le ruissellement dans le bassin versant de la Tafna (Nord Ouest Algérien). Actes du 3^{ème} colloque du département de géographie, Université de Sousse: Espace d'action, espace en action. La méditerranée à l'invite de la géographie. Ed. Dar Alittihad, pp163-185.

ZEKRI N., 2003. Analyse du facteur d'agressivité climatique et son influence sur l'érosion et le ruissellement dans le bassin versant de la Tafna (Nord Ouest Algérien). Mém. Magi, Dép. Forest., Univ. Tlemcen, 101 p.

ZEKRI N., 2000 : analyse des aménagements antiérosifs dans le micro bassin versant du village Tafna (Tout juste à l'amont du barrage de Hammam Boughrara – Tlemcen). Mém. Ing. Dép. Forest., Univ. Tlemcen, 71 p.