

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

Spécialité : Hydropédologie (M2)

Polycopie de cours

Module

CONSERVATION DES EAUX ET DES SOLS

Réalisée par : Hiouani fatima

Année Universitaire 2017/ 2018

CHAPITRE I: Le phénomène d'érosion

1. Introduction

L'érosion est l'usure de la partie supérieure de l'écorce terrestre. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol de son emplacement d'origine par différents agents (eau, vent) vers un lieu de dépôt. La pluie et le vent sont les deux facteurs climatiques qui menacent le plus sérieusement l'état du sol (Touré et *al*, 2004).

Le surpâturage, la déforestation, l'intensification de l'agriculture sont des causes d'augmentation considérable de pertes de terres. L'érosion des sols est un facteur limitant de la production agricole et le quasi totalité du continent africain en est affecté (Touré et *al*, 2004).

L'érosion du sol est un processus au cours duquel des particules de sol sont détachées et déplacées par un vecteur (eau, vent, travail du sol) (Poesen et Govers, 1994).

2. Définition de l'érosion

Selon la FAO (1994), l'érosion vient de (ERODERE), verbe latin qui signifie (ronger). L'érosion ronge la terre.

L'érosion des sols est un phénomène de déplacement de matériaux à la surface du sol sous l'action de l'eau, il s'agit alors d'érosion hydrique, ou sous l'action du vent et il s'agit alors d'érosion éolienne (Stengel et Gelin, 1998).

3. Le processus de l'érosion

L'érosion est un processus selon lequel les particules de sol sont arrachées de leur milieu, transportées par un agent de transport (l'eau, l'air) et déposées en un autre milieu. Ce processus peut s'écrire (Lagacé, 2015):

ÉROSION = ARRACHEMENT → TRANSPORT → SÉDIMENTATION

L'érosion se produit lorsque les forces d'arrachement en présence sur les particules de sol sont plus grandes que leurs forces de résistance. Le phénomène est d'autant plus important que le déséquilibre est grand. La déposition survient lorsque les forces de transport sont plus faibles que le poids des particules (Lagacé, 2015).

4. Les types de l'érosion

4.1. Erosion éolienne

4.1.1. Définition de l'érosion éolienne

L'érosion éolienne est le phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui arrache, transporte et dépose des quantités importantes de terre. Elle s'installe quand (Touré et *al*, 2004):

- IL existe de vents violents et réguliers durant de longues périodes dans la même direction (vents dominants).
- Il s'agit d'un sol à texture grossière, sableux notamment.
- Il existe des reliefs atténués sur des grandes étendues plates.
- Le climat a une saison sèche entraînant la dessiccation des horizons superficiels du sol et la disparition du couvert végétal.

Cette forme d'érosion se manifeste essentiellement dans les zones situées sous un climat semi-aride à aride (moins de 600 mm de pluie, saison sèche de 5 mois au moins) (Combeau, 1977). C'est encore l'absence de végétation qui constitue l'un des facteurs stimulants de cette forme d'érosion (Combeau, 1977).

4.1.2. Facteurs causaux de l'érosion éolienne

Les vents violents sont à la base de cette érosion. L'arrachage, le transport et dépôt des particules de sols, sont fonction de la vitesse du vent, de la taille et de la densité de ces particules, de l'humidité du sol et du couvert végétal (Touré et *al*, 2004).

4.1.2.1. Vent

La vitesse du vent et la durée de l'épisode venteux ont un effet direct sur l'ampleur de l'érosion du sol (Ritter, 2012). L'arrachage des particules du sol est déterminé par les forces du vent qui s'exercent à la surface du sol. La vitesse du vent qui se déplace au dessus de cette surface du sol devient plus importante dès qu'on s'éloigne du sol (Touré et *al*, 2004).

4.1.2.2. Humidité du sol

Des taux d'humidité très faibles à la surface des sols, amène les particules à se détacher et à être emportées par le vent (Ritter, 2012).

4.1.2.3. Longueur des champs ou des parcelles exposée

En l'absence d'arbres, d'arbustes, de résidus, etc., faisant obstacle au vent, celui-ci met les particules de sol en mouvement sur de grandes distances, ce qui augmente l'érosion du sol (Ritter, 2012).

4.1.2.4. Couvert végétal

À certains endroits, l'absence de couvert végétal permanent donne vraiment prise à l'érosion éolienne. Les sols nus, secs et exposés sont les plus vulnérables (Ritter, 2012). Le couvert végétal le plus efficace est composé d'une culture de couverture et de plantations brise-vent établies à des endroits stratégiques (Ritter, 2012).

4.1.3. Mécanismes de l'érosion éolienne

Du point de vue mécanique, le vent a plusieurs modes d'action suivant l'échelle considéré :

4.1.3.1. Mécanismes de mouvement à l'échelle des particules

Il existe trois modes différents d'entraînement des particules : la saltation, la reptation en surface et la suspension.

4.1.3.1.1. Saltation

Le mouvement initial des particules du sol est une série de sauts (figure 01). Le diamètre des particules en saltation est compris entre 0,5 et 1,1 mm. Après avoir sauté, les particules retombent sous l'action de la pesanteur (FAO, 1988). La partie descendante de la trajectoire est très inclinée vers le sol et pratiquement rectiligne (en ligne droite). Peu de particules atteignent une altitude supérieure à 1 m et environ 90 % d'entre elles font des sauts inférieurs à 30 cm. L'amplitude horizontale d'un saut est généralement comprise entre 0,5 et 1 m (FAO, 1988).

Le phénomène de saltation est indispensable pour démarrer l'érosion éolienne. Il est la cause de deux autres modes de transport des éléments du sol par le vent : la reptation en surface et la suspension dans l'air (FAO, 1988).

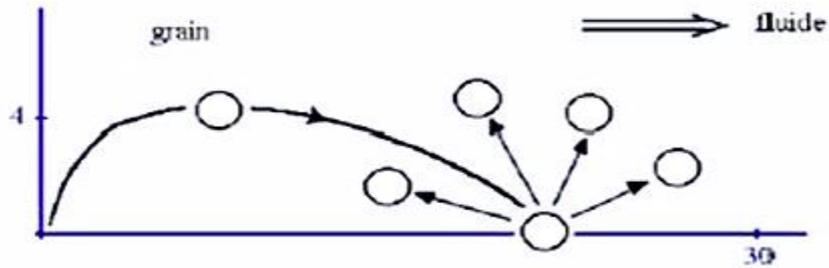


Figure 01 : Schéma de saltation. Les axes sont gradués en diamètre de grain (Touré et *al*, 2004).

4.1.3.1.2. Reptation

Les particules de plus grande dimension roulent ou glissent à la surface du sol (figure 02). Trop lourdes pour être soulevées, leur mouvement est déclenché par l'impact des particules en saltation plutôt que par l'action du vent. Les particules qui se meuvent ainsi ont des diamètres compris entre 0,5 et 2 mm suivant leur densité et la vitesse du vent (FAO, 1988).

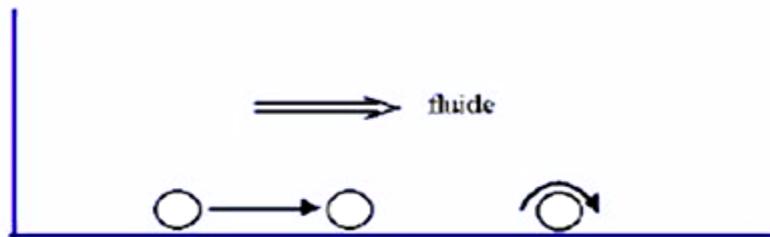


Figure 02 : Schéma de roulement et glissement (Touré et *al*, 2004).

4.1.3.1.3. La suspension

C'est le transport des grains sur une très longue distance (figure 03) sans contact avec le sol (essentiellement restreint aux particules de taille inférieure à 20 μm ou à des vents très violents et turbulents) (Pons, 2007).

D'une façon générale les fines poussières ne peuvent être emportées que si elles ont été projetées dans l'air par l'impact des grains plus gros (FAO, 1988). Une fois parvenues dans la couche turbulente elles peuvent être soulevées à de grandes hauteurs par les courants d'air ascendants et former des nuages de poussière atteignant fréquemment des altitudes de 3 à 4.000 mètres. Même si leur aspect peut être impressionnant, le mécanisme essentiel de l'érosion éolienne demeure la saltation car sans elle de tels nuages ne pourraient se produire (FAO, 1988).

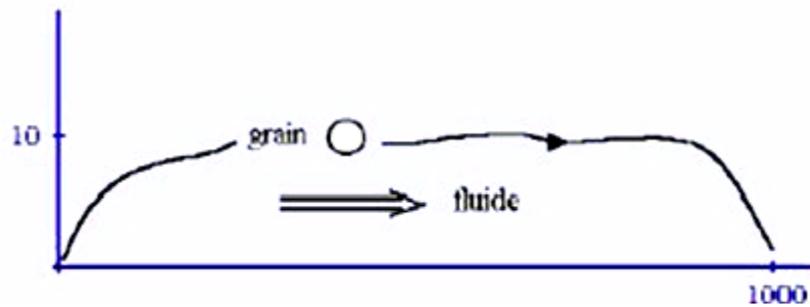


Figure 03 : Schéma de suspension. Les axes sont gradués en diamètre de grain (Touré et *al*, 2004).

Dans les écoulements complexes ou qui possèdent plusieurs gammes de tailles ou de densités de grains, les trois modes de mouvement de grains décrits ci-dessus cohabitent comme schématisé sur le graphique suivant (Touré et *al*, 2004) :

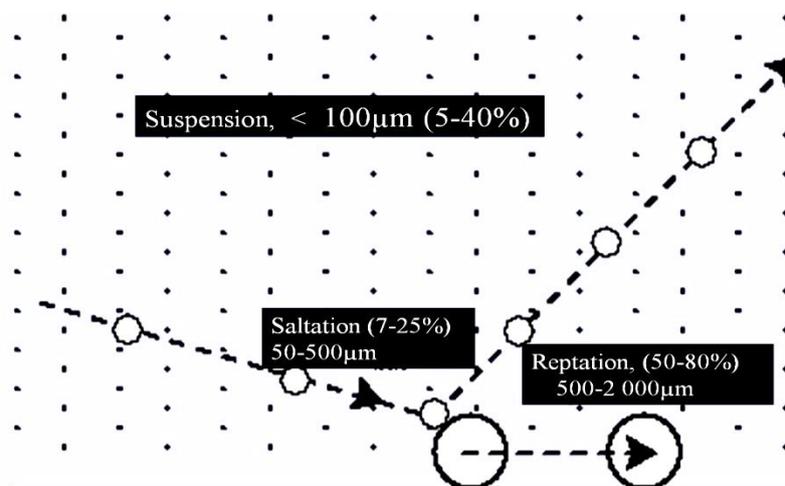


Figure 4: Mode d'entraînement des particules par érosion éolienne (Touré et *al*, 2004).

4.1.3.2. Mécanismes à l'échelle des mouvements globaux

Les particules en mouvement sont le siège d'interactions dont il faut citer principalement (FAO, 1988):

4.1.3.2.1. L'effet d'avalanche

Ce phénomène est la conséquence de la saltation. Les particules qui ont sauté provoquent, en retombant, le départ d'une quantité plus importante de particules. Aussi, lorsque le vent progresse sur un sol dénudé (sol nu), sa charge en particules augmente sans cesse jusqu'à atteindre un maximum tel que la quantité perdue est égale à la quantité gagnée à chaque instant (FAO, 1988).

La charge maximale du vent en particules est sensiblement la même pour tous les types de sols et elle est égale à celle que l'on rencontre sur les dunes de sable (FAO, 1988).

La distance nécessaire pour que cette saturation soit atteinte varie en raison inverse de la sensibilité d'un sol à l'érosion. Ainsi sur un sol très fragile elle peut se produire en une cinquantaine de mètres, et demander plus de 1000 mètres sur un sol de bonne cohésion (FAO, 1988).

4.1.3.2.2. Le triage

Le vent déplace les particules très fines et très légères beaucoup plus rapidement que les grosses (FAO, 1988). Plus les particules sont fines, plus leur vitesse est grande et plus la distance qu'elles parcourent et les hauteurs qu'elles atteignent sont importantes. Le vent sépare ainsi les différents éléments du sol en catégories suivant leurs dimensions: mottes non érodables, gravier, sable, argile et limon. Il emporte ainsi les éléments fins et ne laisse sur place que les éléments grossiers (FAO, 1988).

Une autre conséquence de ce triage est la stérilisation progressive du sol car la matière organique elle-même formée d'éléments fins et peu denses, est l'un des premiers éléments à être emporté (FAO, 1988).

4.1.3.2.3. La corrasion

La corrasion est l'attaque mécanique de la surface sur laquelle souffle un vent chargé de particules. Dans un matériau cohérent et homogène la corrasion se traduit par des stries parallèles ou par un remarquable poli. Le polissage affecte les affleurements comme les cailloux des regs, plus ou moins alvéolés ou façonnés en facettes (FAO, 1988).

Les vents de sable associés aux effets des amplitudes thermiques donnent aux buttes résiduelles découpées dans des couvertures gréseuses, des formes de champignons (FAO, 1988).

Dans les roches meubles et en particulier dans les terres agricoles (argile et limons), les vents creusent des sillons parallèles mettant à nu les racines des jeunes plantes. Lorsque ce phénomène est poussé plus loin, la corrasion délimite des buttes allongées aux profils longitudinaux aérodynamiques, hautes parfois de plusieurs mètres appelées "yardangs" (photo 01) (FAO, 1988).



Photo 01 : Yardang (Touré et *al*, 2004).

4.1.4. Les formes d'accumulation

Lorsque le vent faiblit et perd sa vitesse d'entraînement du sable, celui-ci se dépose. Les formes des accumulations sableuses sont très complexes, non seulement en raison de la structure du courant éolien, mais aussi de la nature de la surface du sol, de la topographie, de la végétation et de la dimension des grains de sable. Nous donnerons ci-après quelques formes caractéristiques de ces accumulations (FAO, 1988):

4.1.4.1. Voile éolien

C'est un saupoudrage diffus des particules sableuses à la surface du sol (FAO, 1988) (figure 05).

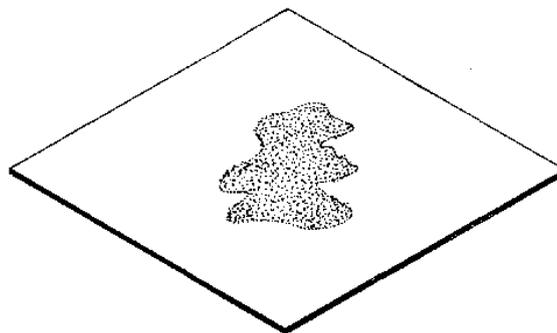
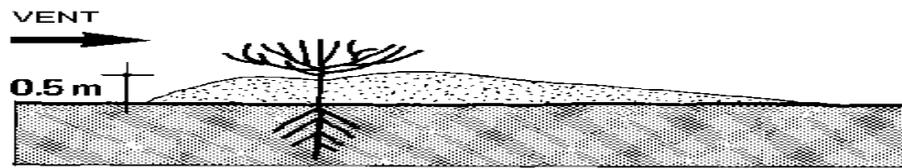


Figure 05 : Voile éolien (FAO, 1988).

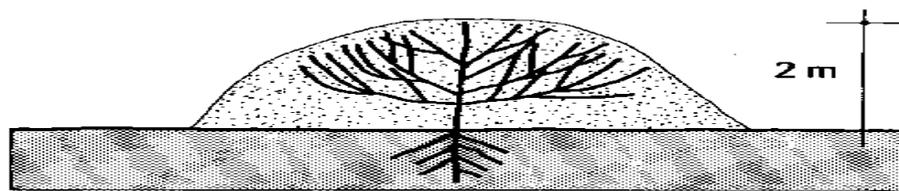
4.1.4.2. Nebka

C'est un dépôt sableux provoqué par un obstacle (végétal, rocheux...) sur la trajectoire des particules sableuses en mouvement. On distingue deux types de nebkas: **nebka à flèche de**

sable et nebka buissonnante (figure 06) (FAO, 1988). Une nebka présente une pente douce sous le vent et une forte pente au vent. Vue en plan, leur forme est ovoïde avec la pointe la plus fine sous le vent. La dimension d'une nebka est de quelques décimètres de hauteur est de 1 à 4 m de long. Une nebka s'édifie rapidement en quelques jours de vent fort de direction constante. Elles peuvent se détruire (FAO, 1988).



Nebka à flèche de sable



Nebka buissonnante

Figure 06: Nebka (FAO, 1988).

4.1.4.3. Barkhane

C'est une dune en forme de croissant à convexité au vent. Sa formation passe par plusieurs stades: bouclier sableux, bouclier barkhanique, dièdre barkhanique (figure 07). Les conditions de leur genèse sont un vent dominant et un substrat cohérent constitué d'éléments de taille supérieure à ceux qui sont mobilisables par le vent (FAO, 1988).

Une barkhane isolée peut être considérée comme un véhicule de transport de sable qui migre dans sa totalité et selon une direction de cheminement conforme à son axe de symétrie qui est la direction du vent. Lorsqu'une dune devient une vraie barkhane, sa dynamique reste la même quelle que soit sa taille jusqu'à un seuil à partir duquel, trop grande pour migrer en totalité, elle devient réservoir de sable pour des barkhanes plus petites. Sa vitesse de migration dépend de sa taille et de la pente sur laquelle elle se déplace, la vitesse diminuant lorsque la taille croît. Quand la surface du sol est inclinée dans le sens du vent, la progression de la dune s'accélère; lorsqu'il y a contre-pente, c'est le contraire qui se produit. La vitesse de déplacement peut atteindre plusieurs dizaines de mètres par an (FAO, 1988).

Les barkhanes ne restent généralement pas à l'état isolé. Elles peuvent se fusionner et former des ensembles plus ou moins complexes allant des chaînes ou trains barkhaniques à de véritables massifs dunaires (FAO, 1988).

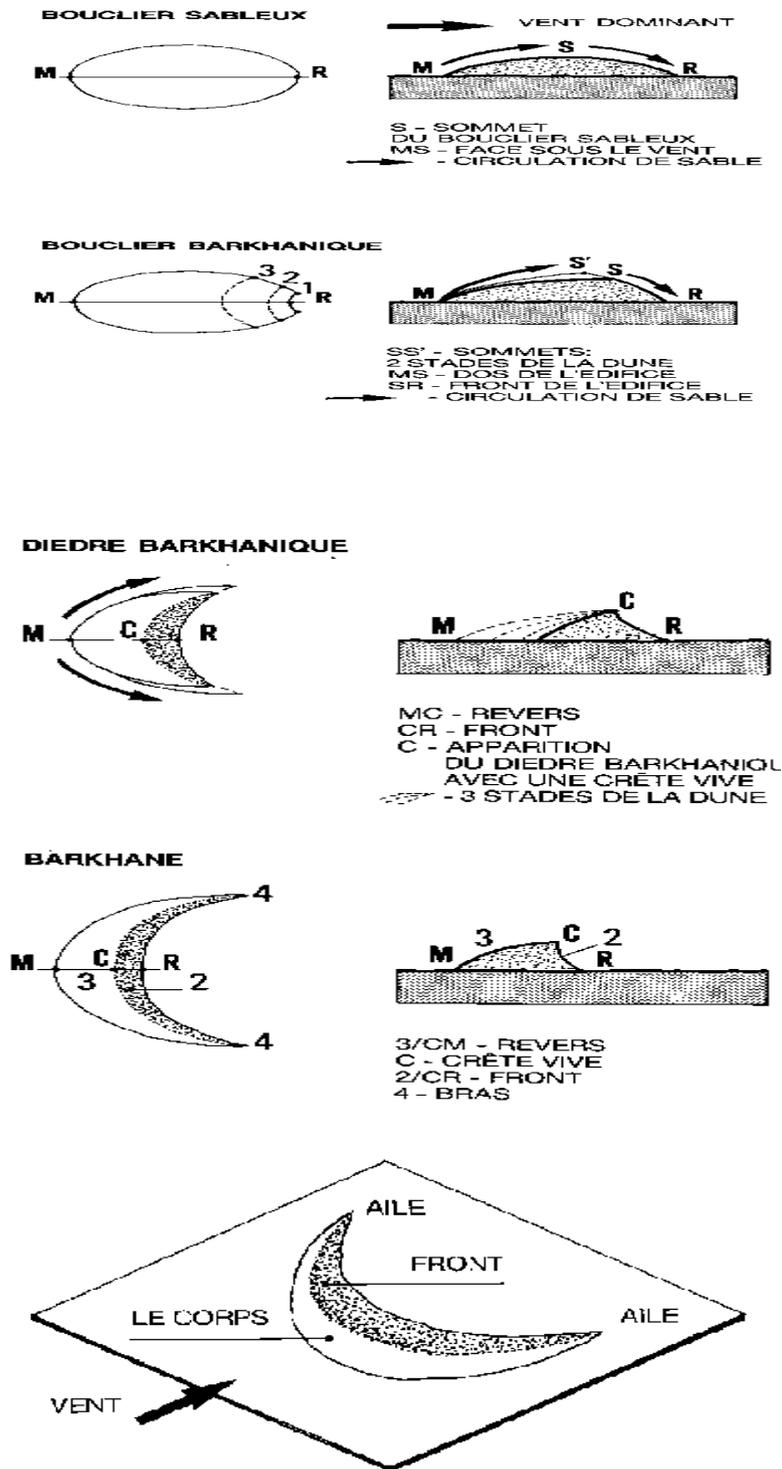


Figure 07 : Edifices barkhaniques et barkhane (FAO, 1988).

4.1.4.4. Dunes linéaires ou sif

Une dune linéaire (figure 08) ou sif du mot arabe saff (sable) est un édifice allongé, étroit, de forme étirée sur toute sa longueur (FAO, 1988). Il possède deux côtés à pentes fortes qui se rejoignent en une crête active. Sa longueur est toujours plusieurs fois plus grande que sa largeur. En moyenne les sifs ont de 2 à 3 kms de long et 30 à 150 mètres de large. Quelquefois ils peuvent être discontinus et assemblés en rides pouvant atteindre 30 à 40 kms de longueur (FAO, 1988).

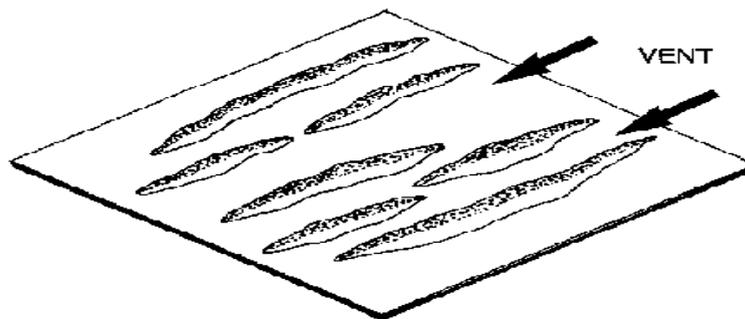


Figure 08 : Dunes linéaires "SIF"(FAO, 1988).

Les dunes linéaires se produisent dans un environnement aride parcouru par deux vents dominants de direction différente, ou par un seul vent dominant dont les filets d'air ont été divisés par des irrégularités topographiques (FAO, 1988). La direction de ces dunes est oblique par rapport au vent résultant annuel. Le mouvement d'une dune linéaire se fait par allongement. Le vent chargé de sable en rencontrant une dune linéaire dépose une partie du sable sur la face de la dune au vent, l'autre partie franchit la crête jusqu'à la face sous le vent, où l'effet de remous du sillage la ramène à la dune. Le sable accroché à la dune migre comme le long d'un rail parallèlement à l'édifice qui s'allonge selon sa propre direction (FAO, 1988).

4.1.4.5. Les dunes en pyramide ou "ghourds"

Ce sont des collines de sable souvent en forme de pyramide étoilée avec trois ou plusieurs bras s'étalant à partir du sommet (figure 09) (FAO, 1988). Pouvant atteindre 300 mètres de hauteur, ces dunes signifient l'absence de vents dominants. Elles naissent à la convergence de plusieurs flux éoliens et sont pratiquement immobiles. Elles constituent une source de sable qui dépend de la direction du vent et de la topographie, et peuvent donner naissance à des barkhanes ou à des dunes linéaires (FAO, 1988).

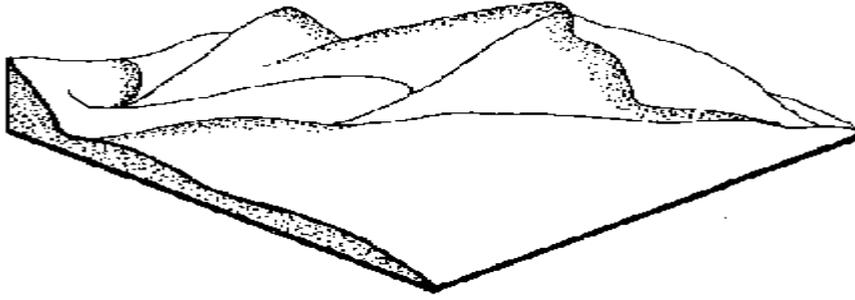


Figure 09 : Dune pyramidale: "ghourd" ou "star dune" (FAO, 1988).

Les ghourds peuvent être alignés et former des chaînes ghourdiques.

4.1.4.6. Aklé

Dense assemblage de dunes qui se tassent et tendent à grimper l'une sur le dos de la précédente (FAO, 1988) (figure 10).

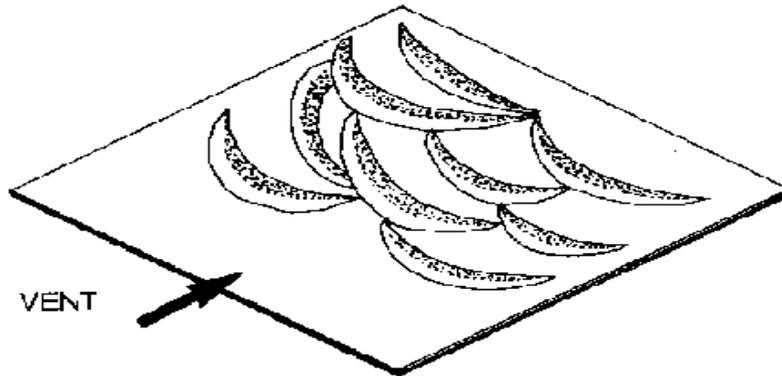


Figure 10 : Aklé (FAO, 1988).

4.1.4.7. Dune parabolique

C'est une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation (FAO, 1988) (figure 11). Sa disposition par rapport à la direction du vent est inverse de celle de la barchane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée (FAO, 1988).

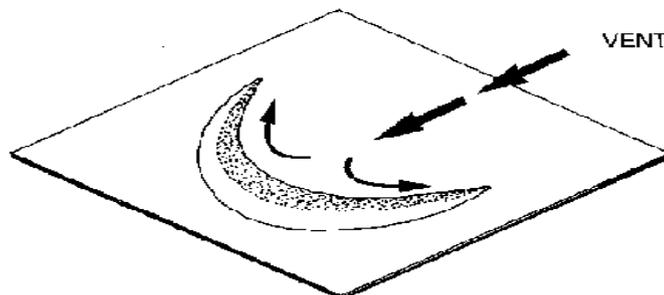


Figure 11: Dune parabolique (FAO, 1988).

4.1.4.8. Cordons longitudinaux: Sandridge

Les cordons allongés (figure 12) ou "sandridges" sont de larges édifices sableux longitudinaux, séparés par des couloirs de déflation. Leur masse globale est immobile (FAO, 1988). Ces cordons longitudinaux sont différents des dunes linéaires. Ils s'alignent dans la direction des vents dominants contrairement aux sifs qui sont obliques par rapport à la direction résultante annuelle. Les dunes linéaires sont façonnées par un dépôt de sable qui arrive obliquement sur la dune tandis que des sandridges existent par suite d'un départ de sable (FAO, 1988).

Les sandridges sont les plus longs édifices éoliens terrestres. Ils ont une toute autre dimension que les dunes linéaires. Leur base est large (FAO, 1988).

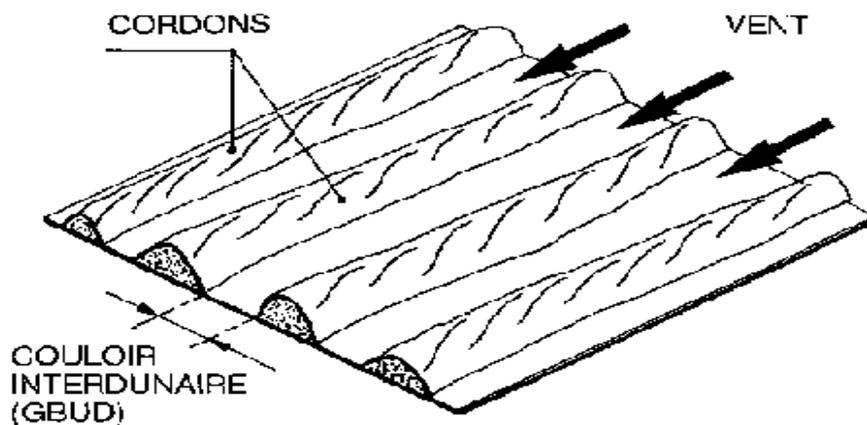


Figure 12 : Dunes longitudinales: "Sandridge" (FAO, 1988).

4.1.5. Estimation de l'érosion éolienne

4.1.5.1. Mesures directes

- Elle peut se faire directement par mesure qualitative des effets sur la baisse de productivité des sols (Zaher, 2010);
- Elle peut être estimée par la quantification de l'ensablement des infrastructures (Zaher, 2010);
- Elle peut être réalisée par la collecte de particules à l'aide de capteurs mobiles situés à différents niveaux au dessus du sol (Zaher, 2010).

4.1.5.1.1. Méthode de piquets

Il s'agit d'un réseau de piquets en fer rond, parfois gradués, dont la disposition sur le terrain dépend du dispositif expérimental et de l'objectif de l'étude (photo 02). Ce réseau de piquets sert à quantifier les apports/pertes en sol (ensablement/érosion) exprimés en hauteur ou en masse et déterminés à partir de l'évolution naturelle du niveau de la surface du sol (Kardous, 2005). Cette quantification est calculée sur la base du bilan des fluctuations du niveau du sol à partir d'un état initial pris comme origine (Kardous, 2005).



Photo 02 : La méthode des piquets utilisée sur le terrain pour quantifier l'érosion éolienne (Kardous, 2005).

Cette technique ne peut fournir qu'une idée très approximative sur le mouvement du sable à l'échelle de la parcelle (Kardous, 2005).

4.1.5.1.2. Méthode de pièges à sable

Pour pouvoir évaluer les quantités de sable déplacées, le sable est attrapé à l'aide de pièges ou des trappes dont quelques dispositifs sont illustrés en photo ci-dessous. Ce sont des collecteurs qui peuvent être disposés à différentes hauteurs au dessus du sol (Touré et *al*, 2004).

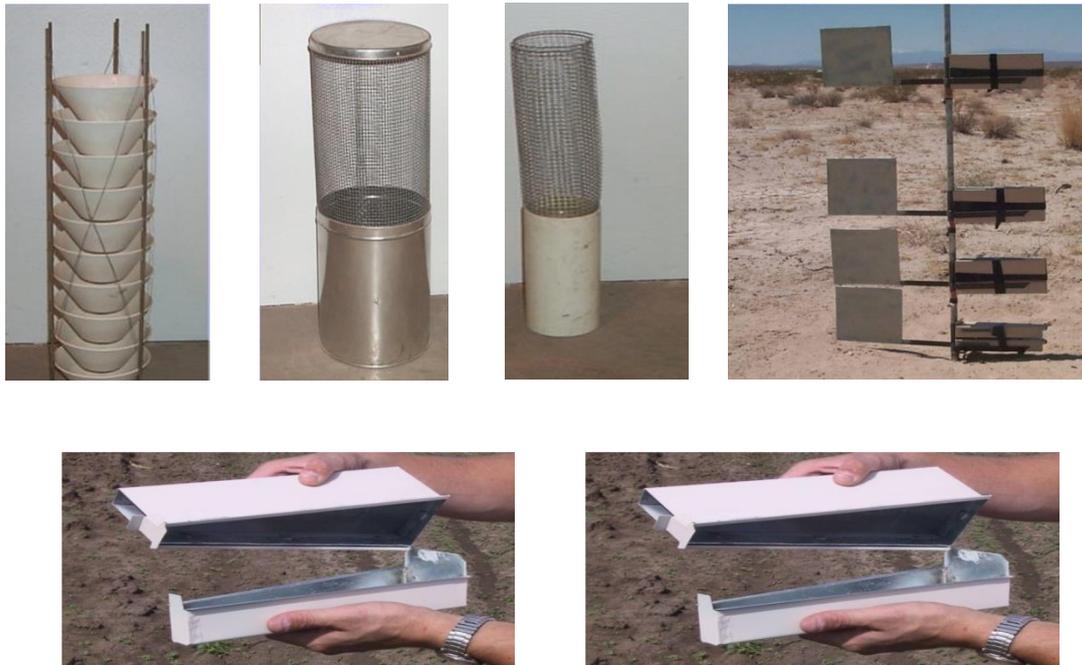


Photo 03: Les collecteurs mobiles de sables (Touré et *al*, 2004 et Zaher, 2010).

4.1.5.2. Mesures indirectes (La modélisation)

L'évaluation de l'érosion éolienne peut se faire indirectement par l'utilisation de l'équation universelle de l'érosion éolienne :

$$E = f(I, K, C, L, V)$$

E : perte potentielle du sol en fonction des plus importants facteurs qui contribuent à l'érosion. Elle est exprimée en T /ha/an.

I: érodabilité du sol qui est fonction de la texture de la structure (facilité de désagrégation du sol).

K: indice de rugosité du terrain

C: facteur climatique qui est fonction du vent et de la température

L: distance couverte par le vent sur le champ dénudé

V: couverture végétale équivalente

Méthode commune

$$E = K \times P$$

avec E : érosion éolienne

K: Facteur de climat qui dépend de:

- 1/ vitesse du vent (énergie cinétique),
- 2/ force d'entraînement du vent et
- 3/ effet du vent sur le dessèchement du sol (degré d'humidité)

P: Facteur de résistance du sol.

Méthodes complexes

Le modèle de chepil et woordruff (1954) représenté par la formule suivante:

$$W = 491,3 \times I / (R \times K)^{0,835}$$

avec W: érosion éolienne (T/acre)

I: Facteur d'agrégation du sol (teneur en particules > 0,84 mm)

R: facteur des résidus des cultures

K: facteur de rugosité de la surface du sol.

Il y a aussi à signaler le modèle de chepil (1959) formulé par l'équation suivante:

$$E = I \times R \times K \times F \times B \times W \times D$$

avec E: érosion éolienne

I: facteur d'agrégation du sol (teneur en particules > 0,84 mm)

R: facteur des résidus de culture

K: facteur de rugosité

F: facteur d'arabilité du sol

B: facteur des brises vents

W: facteur de l'étendue de terrain

D: facteur de direction du vent.

4.1.6. Effets néfastes de l'érosion éolienne

L'érosion éolienne est néfaste pour le développement économique et l'avenir de l'environnement de l'homme dans les zones propices à son installation. Les dangers sont notamment (Touré et *al*, 2004):

- **La baisse de productivité des sols :**
 - Entraînement des éléments fertilisants
 - Dégradation de la structure
 - Dessèchement du sol
 - Dégâts au niveau des plantes

- **L'ensablement des infrastructures :**
 - Ensablement des réseaux d'irrigation
 - Ensablement des parcelles de culture
 - Ensablement des routes, villages, ...etc.

4.2. L'érosion hydrique

4.2.1. Définition de l'érosion hydrique

L'érosion par l'eau est définie comme étant le détachement, le transport et la sédimentation particules de sol sous l'effet de la pluie et de son ruissellement à la surface du sol ou de l'écoulement de l'eau de fonte des neiges. Elle se produit lorsque les forces d'arrachement en présence sont plus grandes que les forces de résistance des particules de sol (Lagacé, 1980).

L'érosion et le ruissellement sont des phénomènes complexes. L'ampleur du ruissellement et du transport de particules de terre dépendent d'une multitude de facteurs et d'interactions: type de culture, techniques de travail du sol, nature du sol et de la roche-mère... L'intensité des pluies ainsi que le degré de la pente et sa longueur comptent parmi les plus importants (Bellande, 2008).

4.2.2. Causes de l'érosion hydrique des sols

4.2.2.1. Intensité des précipitations ou érosivité des pluies (R)

La pluie est le facteur principal de l'érosion hydrique, qui dépendra alors de la durée et de l'intensité des précipitations ou de l'énergie cinétique qui en résulte directement. Cette énergie résulte du diamètre des gouttes et de leur vitesse de chute (Stengel et Gelin, 1998).

Le choc des gouttes peut se traduire en termes d'énergie cinétique s'exerçant sur la surface du sol, donc par un tassement : c'est le phénomène de battance du sol, qui réduit la perméabilité de la pellicule superficielle du sol, et accroît le ruissellement (8 à 40 fois) (Combeau, 1977).

Sous l'effet des gouttes de pluie, les sols nus sont frappés et déstabilisés. En se regroupant l'excès d'eau qui ne s'infiltré pas va couler le long des pentes, formant des ruisseaux à travers les champs, emportant de la terre. Plus la pluie est intense, plus est importante l'érosion qui en découle (tableau 01) (Mahamoudou et Salim, 2011).

Tableau 01: Relation entre l'intensité des pluies et l'érosion (Fournier, 1969).

Pluie (mm)	Erosion (T/ha)
917,2	5.12
907,8	3.44
962.2	5.72
696.5	3.36

4.2.2.2. Facteur topographique ou l'influence de la pente (Ls)

Même de très faibles pentes permettent à l'eau de se mettre en mouvement. Plus la pente est forte, plus les risques d'érosion sont importants (SCPE, 2008).

Les risques d'érosion des sols en fonction de la pente sont évalués de la façon suivante (AREASSN in PNRCMO, 2003) :

Entre 0 et 1% : ruissellement des eaux mais sans érosion

Entre 1 et 3% : érosion diffuse et formation de rigoles

Entre 3 et 5% : érosion forte avec ravinement

Plus de 5% : érosion très forte avec ravinement profond.

L'érosion varie selon le degré de la pente ; plus la pente est forte, plus l'érosion est importante (Mahamoudou et Salim, 2011). Ces chiffres sont à relativiser en fonction du type de sol (tableau 02).

Tableau 02: Effet de la pente sur le l'érosion (Roose et Lelong, 1967).

Pente %	Erosion moyenne en t/ha/an
1,25	5,0
1.5	8.6
2.0	12

4.2.2.3. Couvert végétal (C)

Le risque d'érosion augmente lorsque le sol n'a qu'un faible couvert végétal ou de résidus. Les résidus et la végétation protègent le sol de l'impact des gouttes de pluie et de l'éclaboussement. Ils tendent à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement et permettent une meilleure infiltration (Bannari *et al*, 1999 in El Garouani et Merzouk, 2003).

Plus le sol est dénudé (moins de couvert végétal), plus l'érosion est importante. A l'inverse, lorsque le sol comporte un couvert végétal (herbacé et/ou arboré), il est moins touché par l'érosion. Car, les herbes et/ou les arbres qui s'y trouvent freinent le ruissellement des eaux ainsi que l'entraînement des particules terreuses (Mahamoudou et Salim, 2011).

D'après Combeau (1977), le couvert végétal a un effet direct et un effet indirect ;

Un effet direct : écran des feuilles atténue ou annule l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Et un effet indirect : la liaison entre végétation et taux de matière organique du sol, facteur de la stabilité structurale, de la capacité de rétention et de la capacité d'échange

L'efficacité du couvert végétal et de résidus à réduire l'érosion dépend du type (tableau 03), de l'étendue et de la densité du couvert végétal. La végétation et les résidus combinés, couvrant complètement le sol, interceptent la pluie et sont le moyen le plus efficace pour réduire les pertes de sol (Arnold *et al*, 1989).

Tableau 03: Influence du couvert végétal sur le ruissellement (Nahal in SOLTNER, 1999)

Nature du couvert végétal	Ruissellement (ruissellement/infiltration) x100
Forêt	2%
prairie	5%
Culture de blé- orge	25%
Culture de maïs, coton	50%

4.2.2.4. La texture des sols

Les sols limoneux ou affinés de manière excessive sont plus propices au phénomène d'érosion : ces sols sont en effet plus favorables au phénomène de battance (figure 13). En effet, sous l'impact des gouttes de pluie, les mottes de terre de ces sols éclatent et se désagrègent en fines particules : c'est l'effet splash. Ces particules très fines de terre ont alors tendance à se

compacter à la surface du sol pour former une croûte : c'est la croûte de battance qui réduit l'infiltration de l'eau et favorise le ruissellement (PNRCMO, 2003).

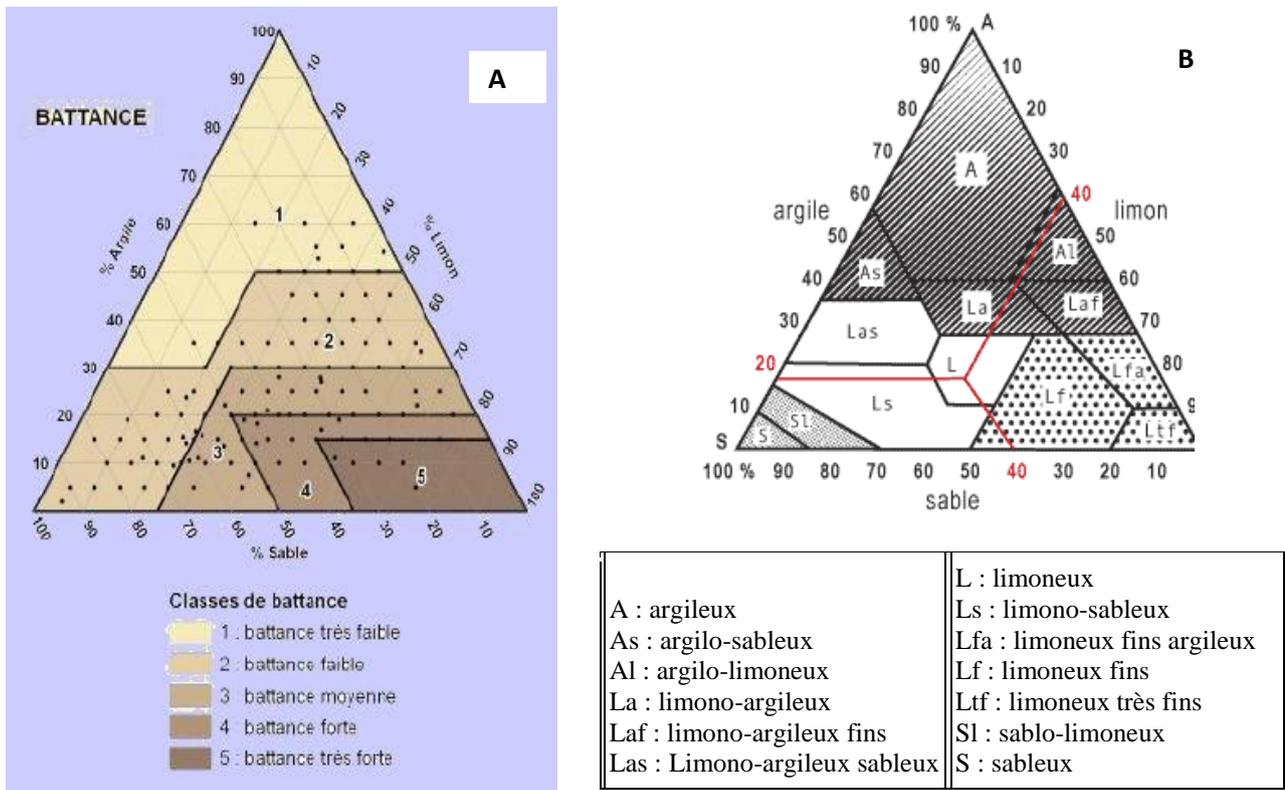


Figure 13: La relation entre la texture et la battance des sols A (Zaher, 2010), B (d'après USDA in Gadrat, 1997).

4.2.2.5. Erodibilité des sols (K)

L'érodibilité représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent (Le Bissonnais et al, 2005). Elle est caractérisée par la résistance au splash (battance).

L'érodabilité d'un sol est une estimation, fondée sur les caractéristiques physiques du sol, de la vulnérabilité de ce sol à l'érosion. L'érodabilité est surtout influencée par la texture du sol, mais elle l'est également par sa structure, sa teneur en matière organique et sa perméabilité. En général, les sols qui affichent une plus grande résistance à l'érosion sont ceux dans lesquels l'eau s'infiltre plus rapidement, ceux qui sont riches en matière organique et ceux dont la structure est améliorée (Ritter, 2015).

4.2.2.6. Facteurs anthropiques

L'érosion est devenue essentiellement une conséquence directe de l'activité humaine qui représente maintenant le principal facteur de la dégradation des sols. L'homme peut être à l'origine du déclenchement et de l'accélération de l'érosion par ses actions de :

4.2.2.6.1. Défrichement des forêts

Le défrichement des terres entraîne une dégradation rapide des propriétés chimiques et physiques des horizons superficiels et l'ont interprétée comme une conséquence de l'agressivité du climat, de la fragilité des sols, de la minéralisation rapide des matières organiques entraînant une accélération des pertes par érosion (Roose, 1982).

4.2.2.6.2. Les incendies

Puisque le feu endommage et ravage le couvert végétal, cela sous entend un risque élevé d'érosion. En fait, les zones sans aucune couverture végétale courent toujours un plus grand risque de forte érosion que les autres (Zaher, 2010).

4.2.2.6.3. Le surpâturage

La disparition de la couverture végétale, laisse donc des surfaces importantes du sol non protégées et par la suite plus exposées aux effets érosifs de l'eau de pluie et du ruissellement (Zaher, 2010).

Le bétail est d'autant plus nocif qu'il exploite plus à fond le végétal (chèvre, puis mouton, puis chameau et bovins). Les troupeaux fixés dégradent plus que les transhumants (Combeau, 1977):

- consommation permanente empêche le remis
- plantes consommées disparaissent au profit de plantes refusées.
- l'effet de piétinement

Pour les transhumants, ces effets se limitent aux pistes, campements

4.2.2.6.4. Les aménagements routiers et urbains

En augmentant les surfaces imperméables, exacerbent les inondations, favorisent le ruissellement et donc constituent un facteur d'entraînement du sol (Yvio, 2008).

4.2.2.7. Érosion liée au travail du sol

La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par le travail du sol dépendent des facteurs suivants :

4.2.2.7.1. Type d'instruments aratoires

Les instruments aratoires qui soulèvent et emportent le sol sont ceux qui déplacent le plus de sol. Par exemple, par rapport à une charrue à versoirs classique, une charrue chisel laisse beaucoup plus de résidus de culture à la surface du sol, mais elle peut déplacer autant de sol et peut même emporter celui-ci sur une plus grande distance. L'utilisation d'instruments aratoires qui déplacent peu le sol contribue à réduire au minimum l'érosion liée au travail du sol (Ritter, 2012).

4.2.2.7.2. Sens du travail du sol

Le travail du sol dans le sens de la pente accentue fortement le phénomène de ruissellement en traçant des lignes d'écoulement préférentielles pour l'eau. Un travail perpendiculaire à la pente est donc souhaitable, bien que parfois difficile à mettre en œuvre (PNRCME, 2003).

4.2.2.7.3. Vitesse d'avancement et profondeur de travail

La vitesse d'avancement et la profondeur de travail du sol ont une influence sur la quantité de sol déplacé. Un travail profond déplace davantage de sol et une vitesse d'avancement accrue pousse le sol plus loin (Ritter, 2012).

4.2.2.7.4. Nombre de passages

La réduction du nombre de passages limite les déplacements de sol. En faisant moins de passages, on laisse aussi une couche de résidus plus épaisse à la surface du sol et on réduit la pulvérisation des agrégats, deux facteurs qui s'opposent à l'érosion hydrique (Ritter, 2012).

4.2.3. Mécanisme de l'érosion hydrique

L'érosion hydrique résulte de divers processus que sont le détachement, le transport et le dépôt ou la sédimentation (figure 14).

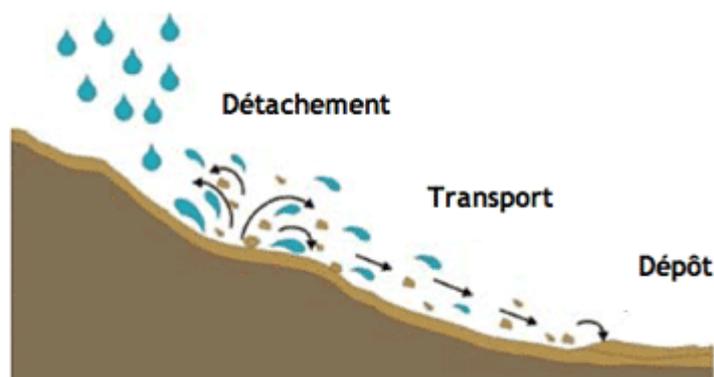


Figure 14: Mécanisme de l'érosion hydrique (Bigi, 2012).

4.2.3.1. Détachement

Le détachement des particules se produit à la surface du sol, sous l'action des gouttes de pluie (figure 15), des agrégats s'éclaboussent ou lorsque la force de cisaillement du ruissellement devient supérieure à la résistance au détachement du sol (LTHE, 2007 in Yvio, 2008).

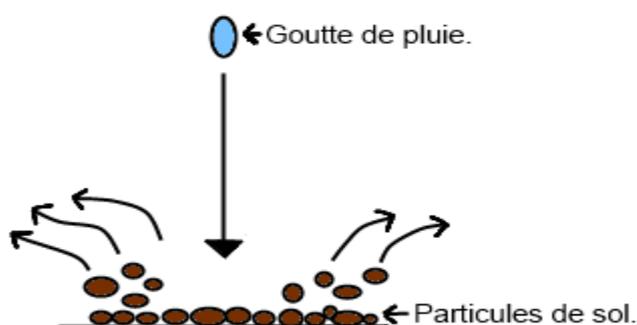


Figure 15: Effet des gouttes de pluie (effet splash).

4.2.3.2. Transport

Les particules issues de la dissociation, grossières ou fines, sont ultérieurement déplacées vers l'aval sous l'action de la gravité. Certains, comme les cailloux d'éboulis et les blocs d'éboulement, tombent directement. D'autres, les plus fins, sont véhiculés par un agent de transport, généralement l'eau (Démangeot, 2000).

Les particules arrachées peuvent être transportées de trois manières (figure 16) par l'écoulement (Lagacé, 2015):

4.2.3.2.1. En suspension : l'écoulement ou l'impact des gouttes de pluie sur la lame d'eau provoque une turbulence qui maintient les particules fines en suspension. Ces particules fines sont alors transportées sur de grandes distances.

4.2.3.2.2. Par roulement : lorsque l'écoulement devient important, il peut arracher de plus grosses particules mais ne peut les mettre en suspension. La force de l'écoulement les roule sur le fond.

4.2.3.2.3. Par saltation : lorsque les particules sont de grosseur moyenne, elles peuvent se déplacer par sauts successifs (saltation).

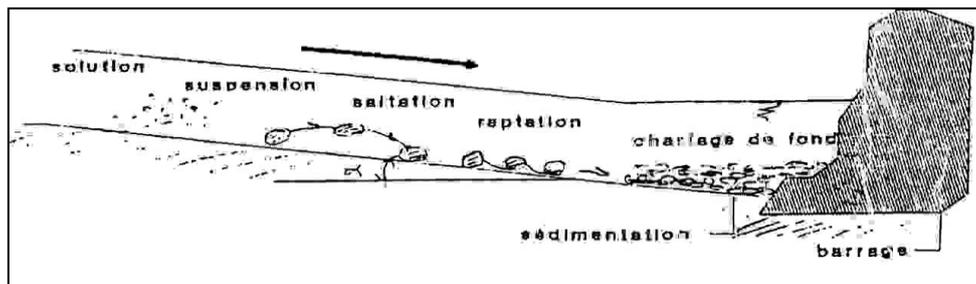


Figure 16: Mode de transport par ruissellement (Touré et al, 2004).

4.2.3.3. Dépôt

Il s'effectue lorsque, la vitesse de l'écoulement diminue, le poids des particules devient plus important que les forces de turbulence ou de roulement et les particules se déposent. Les plus grosses se déposent en premier et les plus petites par la suite (Lagacé, 2015). Elles se déposent en général dans l'ordre suivant : Sable grossier, sable fin, limon.

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où ils se déposent soit après évaporation de l'eau, soit après floculation (Bigi, 2012).

4.2.4. Les formes de l'érosion hydrique

4.2.4.1. L'érosion en nappe

Les particules de sol non protégées se détachent en raison de piétinement, et de l'impact des précipitations. Les particules sont arrachées et transportées, le phénomène est observé sur les pentes faibles. Elle se produit habituellement d'une manière égale sur une pente uniforme et passe inaperçue jusqu'à ce que la quasi-totalité de la couche arable productive ait été enlevée (Ritter, 2012). Le sol fertile détaché par l'érosion se retrouve au bas de la pente (photo 04) ou dans des terres basses (Ritter, 2012).



Photo 04: Erosion en nappe (Zaher, 2010).

4.2.4.2. L'érosion en rigoles

On assiste à l'érosion en rigoles quand les eaux de ruissellement se concentrent et forment des filets ou rigoles (photo 05). Ces dépressions bien définies qui résultent de l'enlèvement du sol par la force de l'eau qui coule sont néanmoins suffisamment petites pour ne pas nuire au travail de la machinerie. Dans bien des cas, ces rigoles sont comblées chaque année par le travail du sol (Ritter, 2012).



Photo 05: Erosion en rigole (Zaher, 2010).

4.2.4.3. Le ravinement

Quand les rigoles s'approfondissent au cours du temps, elles forment des ravines en forme de V (photo 06) si le sous sol est tendre, et en forme de U quand le sous sol est dur (Ben Salah, 1984).



Photo 06 : Erosion en ravinement (SCPE, 2008).

4.2.5. Quantification de l'érosion hydrique

Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles de travail. La quantification peut se faire par :

- Mesures directes
- Des évaluations indirectes

4.2.5.1. Les mesures directes

4.2.5.1.1. Mesure par rugosimètre à aiguille

Le rugosimètre à aiguille est constitué d'un cadre portant une barre avec des trous uniformément répartis dans lesquels viennent coulisser des aiguilles de 1mm de diamètre (Kuipers, 1957 in Nord 2006; Podmore et Huggins, 1981 in Nord 2006). Ces aiguilles sont enfoncées jusqu'à être en contact avec la surface du sol. Les extrémités supérieures des aiguilles forment une ligne presque continue que l'on peut reporter sur un graphe ou photographier. Le rugosimètre à aiguille (photo 07) a été beaucoup utilisé sur le terrain comme en laboratoire. La résolution obtenue est de 1 à 2mm verticalement et généralement de 20 à 25 mm horizontalement (Jester and Klik, 2005 in Nord 2006).

Le principe de mesure est de suivre de l'évolution des ravines; on mesure la variation des dimensions de certaines sections des ravines après chaque événement pluvieux.

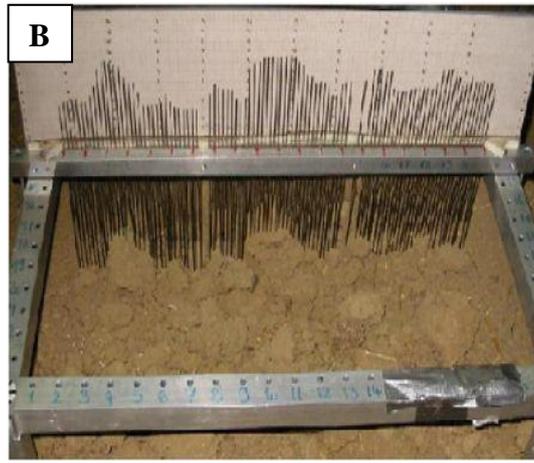


Photo 07: Le rugosimètre à aiguille A (Zaher, 2010), B (Nord 2006).

4.2.5.1.2. Laser-scanner

Récemment des instruments à base de laser-scanner (photo 08) ont été développés pour mesurer la rugosité de surface avec une résolution importante et sans contact avec le sol (Darboux et Huang, 2003 in Nord, 2006). La résolution est de l'ordre de 0.1 à 0.5 mm verticalement et 0.1 à 2 mm horizontalement (Nord, 2006).

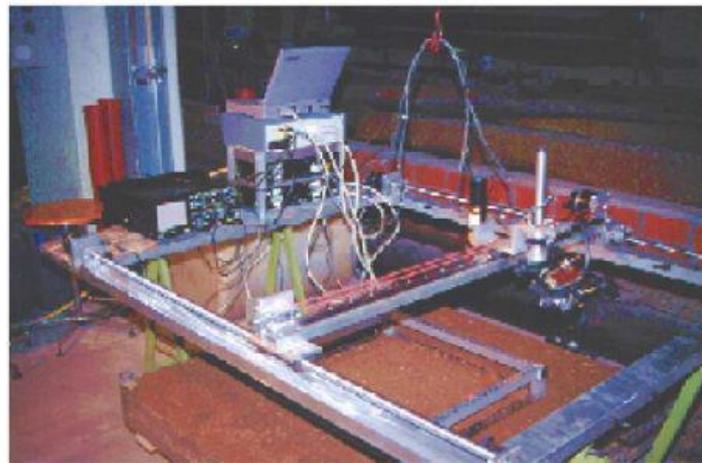


Photo 08: Le laser-scanner (Nord, 2006).

4.2.5.1.3. Simulation de pluie

L'objectif est de déterminer certaines caractéristiques hydrodynamiques des sols et ce, à petite échelle et sous diverses conditions de pluie et de sols. L'utilisation des simulateurs de pluie présente plusieurs d'avantages puisqu'ils (Zaher, 2010):

- Sont des dispositifs mobiles

- Sont capables de produire à volonté des pluies d'intensité, de hauteur et d'énergie semblables à celles des pluies naturelles
- Permettent de simuler des averses de fréquence rare qui causent le plus de dégâts
- Permettent de raccourcir les temps d'observation sur le terrain.

Il y a plusieurs types de simulateurs des plus simples ou plus complexes. Le très simple, c'est le modèle minisimulateur (photo 09).

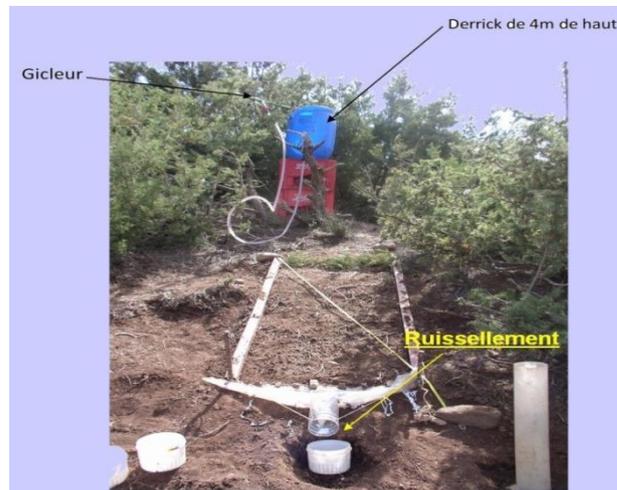


Photo 09: Simulateur de pluie (Zaher, 2010).

4.2.5.1.4. Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues

L'estimation de la quantité des sédiments déposés dans une retenue dépend de deux paramètres : la densité et le volume des sédiments (Zaher, 2010).

La densité des sédiments est variable en fonction du temps et en fonction de la position dans la retenue. Elle varie en fonction de la granulométrie, la composition minéralogique, l'épaisseur des dépôts, le niveau de l'eau dans la retenue et l'âge des dépôts (Zaher, 2010).

Quant au volume des sédiments, il est déterminé sur la base d'une comparaison de la topographie de la cuvette avant et après mise en eau du barrage (Zaher, 2010).

4.2.5.2. Les mesures indirectes (La modélisation)

4.2.5.2.1. Le modèle empirique de perte en terre de Wischmeier et Smith (USLE) (Universal Soil Loss Equation)

Ce modèle empirique exprime les pertes en sol selon l'équation universelle de perte en sol. Il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe. C'est le produit de différents facteurs selon la formule (Revised Universal Soil Loss Equation de Wischmeier (1976) in El Garouani et al, 2008):

L'équation USLE s'exprime par la relation : $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$

A : la perte de sol moyenne due à l'érosion à long terme est exprimé t/ha/ans

R : l'érosivité des pluies. Il a été défini comme le produit de l'énergie de la pluie par son intensité maximum en 30 minutes. Exprimée en cm par heure. Cet indice correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente.

K : d'érodibilité du sol. Elle peut être définie comme la susceptibilité du sol à l'érosion et est établie par rapport à une parcelle standard, évaluée en tenant compte de la texture, de la teneur en matière organique, de la structure et de la perméabilité du sol. Il varie de 0.70 pour les sols les plus fragiles à 0.01 sur les sols les plus stables.

S x L : la topographie (L : longueur de la pente, S : inclinaison de la pente).

P : les pratiques antiérosives (pratiques culturelles anti-érosives)

C : indice culture, caractérise l'effet du couvert végétal. Il tient compte de la nature et de la succession des cultures, et du degré de fertilisation minérale ou organique. C'est le rapport des pertes en terre d'une terre cultivée dans des conditions définies à celles d'une jachère continuellement travaillée ($C = 1$) (cas de la parcelle de référence)

4.2.5.2.2. L'utilisation de l'imagerie satellitaire

L'acquisition de données satellitaires, une technique et un outil couramment utilisés aujourd'hui, peut servir à la cartographie des risques érosifs à grande échelle (parcelle, petit bassin, versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de Km^2 (Zaher, 2010). Cette approche ne peut en aucun cas remplacer les études de terrain pour établir une compréhension du phénomène de l'érosion. Actuellement, on peut atteindre une précision cartographique compatible avec des échelles de l'ordre du 1/25 000^{ème} et de 1/50 000^{ème} (Zaher, 2010). Certes, la cartographie directe des traces d'érosion n'est pas possible à l'heure actuelle, mais on peut en revanche étudier des critères indirects révélant, en surface, la présence de phénomènes érosifs. Le choix de la dégradation structurale de la surface des sols, qui favorise le ruissellement puis l'érosion, peut être utile pour l'estimation de la gravité de l'érosion sur une grande étendue de surface (Zaher, 2010).

L'utilisation des données de la télédétection pour une connaissance spatialisée des facteurs de différenciation de l'érosion (occupation du sol, importance du couvert végétal, ...) et sur l'usage du système d'information géographique (SIG) pour des opérations d'analyse (figure 17) et de modélisation des processus d'érosion et de déposition (El Garouani et al, 2008).

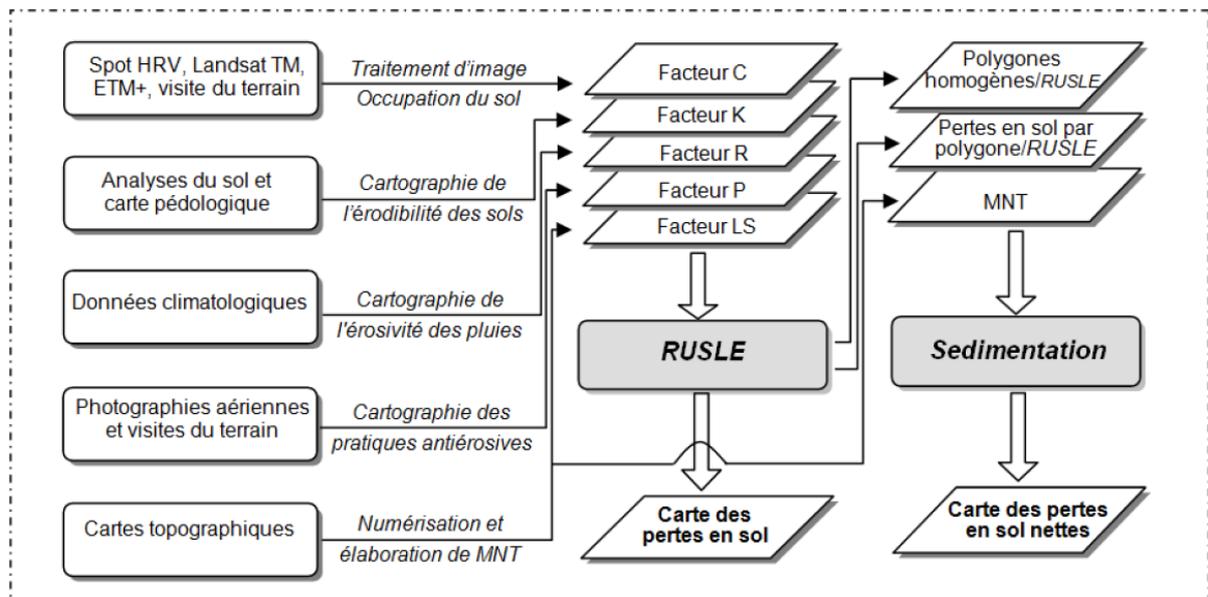


Figure 17: Schématisation de la démarche utilisée (El Garouani et al, 2008).

4.2.5.2.3. Utilisation des radioisotopes : le césium-137

Le césium-137 est un radioélément artificiel introduit dans l'atmosphère par les essais nucléaires. Une fois incorporé dans le sol, il est fixé aux particules et permet donc de suivre leur devenir. L'établissement de l'inventaire de ce dernier dans des profils de sol non perturbé permet d'évaluer le taux d'érosion sur un site donné (Zaher, 2010). Ensuite, à l'aide de différents modèles, la perte en sol peut être estimée sur la base des pertes en radioéléments (Zaher, 2010). L'apport majeur de cette technique par rapport à des suivis ou des expérimentations sur le terrain est que l'érosion est estimée non pas à un instant donné mais sur une période de temps couvrant les 40 dernières années dans le cas du ^{137}Cs (Zaher, 2010). Vu son intérêt et sa précision, cette méthode est de plus en plus utilisée. C'est une technique qui permet une estimation assez rapide de l'érosion et capable de prendre en compte les variations temporelles et spatiales à l'échelle du bassin-versant (Zaher, 2010). Plusieurs auteurs considèrent alors que la perte de sol subie par la couche labourée est directement proportionnelle à la réduction de l'activité spécifique du sol en ^{137}Cs (Bernard et al, 1995):

$$E = [CL/ N] \times [1 - (Tn/To)]$$

E : perte de sol (t/ha/an)

To : activité spécifique en ^{137}Cs du sol d'un site non-érodé (Bq m^{-2}) (BP : en becquerels)

Tn : activité spécifique en ^{137}Cs du sol d'un site érodé (Bq m^{-2})

CL: poids de la couche labourée (t/ha)

N : nombre d'années depuis le maximum de retombées (exemple : 1963).

4.2.6. Conséquences de l'érosion

4.2.6.1. Conséquences de l'érosion des sols

L'érosion hydrique entraîne des conséquences tant en amont qu'en aval des bassins versants (Le Bissonnais et *al*, 2002):

En amont : par

- La destruction des semis dans la zone de décapage ;
- Le déchaussement et l'arrachement des plants ;
- La perte de la fertilité (Des pertes en matière organique et en éléments nutritifs) ;

- Des pertes en terre

En aval : par

- La formation des crues ;
- Le sapement de chaussées ;
- Comblement des réseaux de collecte des eaux ;
- La dégradation de la qualité des eaux souterraines ;

- Colmatages des réseaux d'assainissement et des ouvrages de retenue des eaux pluviales (Beauchamp, 2006 in Yvio, 2008) ;
- Envasements des cours d'eau (Beauchamp, 2006 in Yvio, 2008) ;
 - L'augmentation du ruissellement et l'entraînement des particules du sol (Beauchamp, 2006 in Yvio, 2008) ;
- Les coulées de boues (Beauchamp, 2006 in Yvio, 2008) ;
- Inondations (Beauchamp, 2006 in Yvio, 2008).

4.2.6.2. Conséquences de l'érosion sur l'eau

L'érosion des sols contribuerait dans une proportion voisine de 20% à la pollution chimique des cours d'eau. Sur un bassin versant les concentrations en pesticides trouvées dans l'eau après un orage, peuvent atteindre plus de 1 000 fois les normes.

L'eau peut s'infiltrer et percoler vers la nappe phréatique et les cours d'eau, et dans ce cas, elle lessive une partie de ce qui est soluble dans le sol (nitrates, pesticides...). Elle peut également ruisseler à la surface et transporter vers les cours d'eau les sédiments et tout ce qui y sont associés : pesticides, engrais, matières organiques (Fox et *al*, 2008)...

Chapitre 2 : Les méthodes de conservation des eaux et des sols

1. Méthode de lutte contre l'érosion éolienne (techniques de fixation des dunes)

Les méthodes de protection utilisées et les normes établies varient selon l'expérience propre de chaque pays, selon les particularités du périmètre traité, la nature et la disponibilité en matériaux locaux naturels ou artificiels, mais aussi selon la stratégie politico-économique établie en fonction des objectifs recherchés. L'efficacité des techniques reste locale et n'est pas généralisable à d'autres sites menacés : c'est là un des points critiques de la lutte contre l'ensablement (Mainguet et Dumay, 2006).

L'efficacité de la lutte par rapport aux infrastructures et aux aménagements constitue par ailleurs un critère déterminant du choix des techniques à développer. Toutes les méthodes doivent prendre en compte (Mainguet et Dumay, 2006):

- l'accès des paysans et des nomades à leurs champs et à leurs pâturages ;
- une bonne distribution des productions agricoles ;
- l'organisation traditionnelle des villages ;
- les coûts financiers des techniques de lutte et surtout de leur maintenance

1.1. La fixation mécanique des dunes (les palissades)

La palissade est un obstacle linéaire opposé au vent dominant pour en diminuer la vitesse et provoquer à son niveau l'accumulation du sable en mouvement. Cette accumulation aboutit à la formation d'une dune artificielle qui constitue la première phase de la lutte contre l'ensablement (FAO, 1988).

La palissade placée à 200 ou 300 mètres du site à protéger est alors orientée perpendiculairement à la direction du vent dominant.

1.2. Fixation biologique

Après la stabilisation des sables par des opérations mécaniques, il est indispensable de fixer les dunes de manière définitive en provoquant leur recolonisation par la végétation.

Le choix des espèces végétales utilisables (ex : tamarix, acacia, eucalyptus, cyprès, casuarina...) doivent avoir les caractéristiques suivantes (Malagnoux, 2011):

- Etre adaptées aux conditions locales ;
- d'adaptations des espèces choisies aux conditions bioclimatiques de la zone en question ex : résistance à la sécheresse, supporter de gros écarts de température entre le jour et la nuit.
- Etre peu exigeantes en éléments nutritifs ;
- Etre résistantes aux vents violents, au déchaussement et à l'ensevelissement ;
- Avoir un enracinement profond ;

- Avoir un développement initial rapide afin de fixer et protéger le sol dans un bref délai
- Se régénérer naturellement et améliorer le sol.
- Bois non cassant

Et les arbustes tels que ; roseau, cactus, sesbania, agave, tephrosia.

Un ou plusieurs rangs d'arbres, L'optimum serait de 4 rangs, soit 10-12 mètres de large (permet l'exploitation des arbres) (Combeau, 1977).

1.3. Fixation physico-chimique

Cette technique consiste à recouvrir le sable d'une couche protectrice aussi uniforme que possible pour supprimer l'action du vent au niveau du sol et empêcher le phénomène de saltation. Les procédés utilisés sont divers (Malagnoux, 2011):

- Protection du sol par épandage d'une couche plus ou moins épaisse de terre organique;
- Paillage à l'aide de résidus agricoles, d'herbes, de sous-produits de l'industrie agroalimentaire (ex : bagasse).
- Aspersion d'eau ; le sable humide étant plus lourd et plus adhérent que le sable sec.
- Pulvérisation d'un mélange eau/argile;
- Couverture du sol par des films plastiques;
- Pulvérisation d'huiles minérales (huiles lourdes, huiles brutes) ou de latex ;
- Stabilisation à l'aide de produits chimiques (liants).

2. Méthode de lutte contre l'érosion hydrique

2.1. Les méthodes physiques

2.1.1. Les cordons en pierres

Les cordons pierreux sont des obstacles filtrants qui ralentissent la vitesse de ruissellement (photo 10); ils permettent la sédimentation des particules (sables, mais aussi terre fine, matière organique) à l'amont de la diguette, une augmentation de l'infiltration des eaux ruisselantes (Hier, 1995). La mise en place des dispositifs filtrants qui ont l'avantage de laisser passer l'eau excédentaire et donc ne risquent pas d'être emportés (Ruelle et *al*, 1990). Les cordons en pierres mesurent au maximum 30cm de haut.

Les encordons en pierres sont utilisés en régions arides et semi-arides, sur des sols caillouteux et perméables et à pente <15% (HCEFLCD, 2014).



Photo 10: Les cordons en pierres (HCEFLD, 2014)

2.1.2. Les murettes

La construction d'une murette en pierre sèches suivant les courbes de niveau (figure 18) ; sur pente moyenne à forte (5-30%) (HCEFLCD, 2014). 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 entrainés dans la zone comprise entre deux ouvrages, elle se colmate peu à peu en amont.

Les murettes dépassent de 50cm le niveau du sol en amont. Les pierres doivent être empilées soigneusement. Le choix des pierres est extrêmement important. Pierres plates, anguleuses et grandes (20-25cm maximum). Les espaces entre les pierres doivent être comblés avec des pierres plus petites (Biji, 2012).

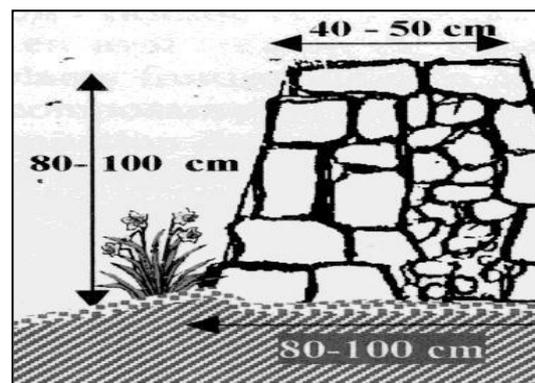


Figure 18: Murette en pierre sèche (HCEFLD, 2014).

2.1.3. Les terrasses

Le but des terrasses est de diminuer la longueur de la pente de l'écoulement en construisant un fossé intercepteur (figure 19) qui acheminera sécuritairement l'eau vers l'extérieur de la parcelle (Lagacé, 2015).

Il existe plusieurs types de terrasses : terrasse en escalier, terrasse avec un fossé d'interception, terrasse de conservation. Les terrasses réduisent l'érosion de 85 à 90% sur la parcelle (Lagacé, 2015).

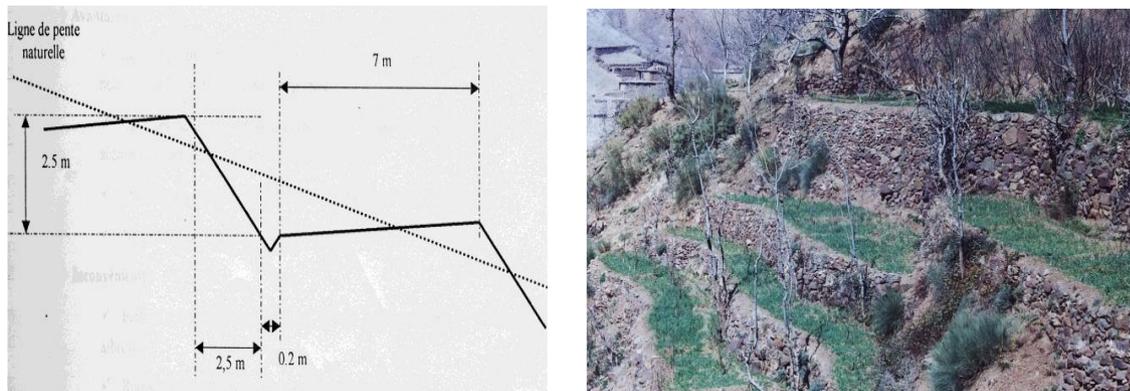


Figure 19: Les terrasses (HCEFLD, 2014).

2.1.4. Les gabions

Les gabions sont de pierres et montés les uns sur les autres (photo 11). Les pierres remplissent les gabions auront des dimensions suffisantes pour ne pas passer entre les mailles et seront bien réparties dans chaque cage ; il ne faut pas placer les petites pierres au centre et les grosses à l'extérieur (ME, 1999).

Il est donc préférable de remplir les gabions à la main, ce qui minimise le risque d'une déformation importante de la structure à moyen terme (ME, 1999).

A moyen ou long terme, les mailles des gabions peuvent être brisées par les troncs d'arbres et autres matériaux susceptibles d'être charriés par le courant ; c'est là le principal inconvénient des murs en gabions (ME, 1999).

Les gabions sont destinée à freiner la vitesse d'écoulement des eaux de crues et permettent ainsi de recharger la nappe souterraine, irriguer les terrasses avoisinantes par épandage d'une partie des eaux de ruissellement réduire le pouvoir érosif des eaux et les risques d'inondation dans les zones en aval (Sghaier et *al*, 2011). Les gabions sont recommandés pour les sols argileux et argileux limoneux (DINEPA, 2013).



Photo 11: Les seuils en gabion utilisées dans la fixation des ravines (Melalih, 2012).

2.1.5. Les seuils en pierres sèches

La construction des seuils en pierres traversant le ravin en largeur (photo 12). Ce sont des petits barrages implantés transversalement dans les lits des ravins qui sont consolidés par des moyens biologiques. Les objectifs de leurs installations sont (HCEFLCD, 2014):

- Contribuer à la recharge de la nappe par la réduction de la vitesse d'eau;
- Retenir les sédiments en amont des seuils ;
- Stabiliser les berges des ravins ;
- Augmenter le taux d'humidité dans les zones semi-arides.



Photo 12: Les seuils en pierres sèches (Melalih, 2012).

2.1.6. Seuils en pierres cimentées

Construction des seuils en pierres cimentées disposé perpendiculairement à l'axe de l'entaille (photo 13). De hauteur < 3m avec un déversoir de forme curviligne, et un atterrissement artificiel afin de minimiser le choc des premières crues. Les conditions d'application des seuils en pierres cimentées sont (HCEFLCD, 2014) :

- Correction des ravins de dimensions importantes.
- Ouvrages préconisés dans les versants pierreux ou les pierres sont friables et la roche mère est schisteuse
- Ouvrage en pierres friables est consolidé par un béton maigre est ajouté de manière grossière
- Ne conviennent pas dans les terrains argileux

Les avantages des seuils en pierres cimentées sont :

- Contribution à la recharge de la nappe par la réduction de la vitesse d'eau.
- Rétention de sédiments en amont des seuils.
- Stabilisation des berges de ravins.
- Dans les zones semi-arides un gain en humidité de plus de 40%.



Photo 13: Seuils en pierres cimentées (HCEFLD, 2014).

2.1.7. Banquettes

La banquette est un ouvrage de forme rectangulaire construit en terre compactée, en pierres ou avec un mélange des deux (figure 20). Elle est soit perméable, soit imperméable (GIZ, 2012). La digue principale de l'ouvrage a une longueur pouvant aller jusqu'à 80 m. Les « bras » des deux côtés ont une largeur qui peut atteindre 15 m. Les banquettes sont construites en quinconce selon les courbes de niveau et ont une ouverture vers l'amont. La distance entre les banquettes est d'environ 6 m sur une même ligne et, selon la pente, d'environ 25 m entre les lignes (GIZ, 2012).

Du côté aval de l'ouvrage, on creuse un fossé de réception de l'eau d'une largeur de 0,50 m et d'une profondeur de 0,30 m. Le sol excavé et damé sert à la construction de la digue principale (GIZ, 2012).

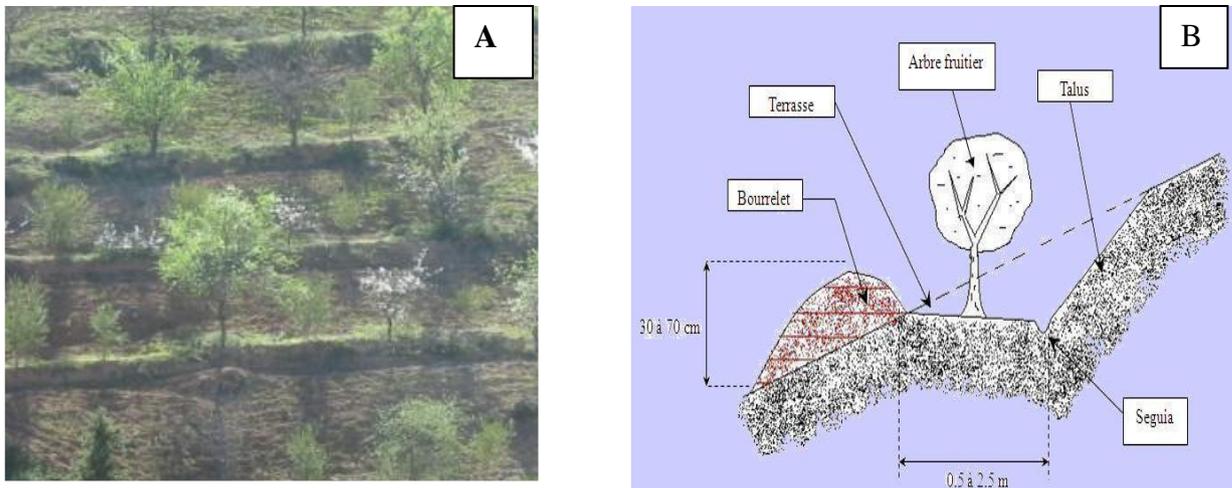


Figure 20: Banquette A (HCEFLD, 2014), B (Zaher H, 2010).

2.2. Les méthodes biologiques et les pratiques culturales

2.2.1. Le reboisement et reforestation

L'installation d'une végétation à croissance rapide tel que : Eucalyptus, Acacia, Pins, Atriplex, laurier rose, cactus, etc. pour assuré une amélioration de la couverture du sol et son enrichissement en matière organique.

2.2.2. Le paillage

Consiste à étaler des résidus de récolte sur les parcelles sensibles à l'érosion. La paille en absorbant l'énergie cinétique des gouttes de pluie, Contribue à protéger la surface recouverte contre l'agressivité des précipitations en limitant plus spécialement les effets de l'érosion splash (Regis et Roy, 1999).

Le paillage (photo 14) agit de différentes façons par la matière organique qu'il apporte, il enrichit le sol et améliore ses qualités physiques en augmentant la perméabilité. Donc l'augmentation de la quantité de la paille minimise le ruissellement et les pertes en terre (tableau 04).

Tableau 04: Effet du paillage sur le ruissellement et les pertes en terre (Bigi, 2012).

T/ha de résidus	0	2.5
Ruissellement: hauteur totale (mm)	84	51
Vitesse (m/s*1000)	2.2	0.6
Concentration en sédiments (g/l)	38	7
Pertes en terre (t/ha)	33	4



Photo 14: Le paillage (Bigi, 2012).

2.2.3. Le billonnage

Le labour suivi d'un billonnage, ou en oriente le billon, perpendiculaire à la plus grande pente, ceux-ci peuvent stocker dans le sillon une quantité non négligeable d'eau et de matériaux sableux ou limoneux en suspension. Le billonnage en courbe de niveau est deux fois plus efficace que le simple labour en courbe de niveau (Roose, 1994).

Les billons sont mis en place en fin de saison sèche, quelques jours avant les plantations. Les billons peuvent être disposés (Mahamoudou et Salim, 2011):

- Parallèlement aux courbes de niveau. Tel est le cas lorsque la pente est inférieure à 40% ;
- Dans le même sens que la pente. Tel est le cas lorsque la pente est supérieure à 40%.

Le billonnage a plusieurs intérêts (Mahamoudou et Salim, 2011). Il :

- Constitue une barrière physique à l'érosion ;
- Evite l'excès d'humidité dans les terres argileuses ;
- Augmente le volume de terre exploitée par les racines. Il est donc conseillé sur les sols peu profonds ;
- Diminue l'attaque des escargots et limaces ;
- Augmente les rendements comparativement à la plantation à plat.

2.2.4. La rotation des cultures

La rotation des cultures sur une même parcelle permet de réduire l'érosion. Elle agit sur la résistance du sol par (Biji, 2012):

- les apports humifères;
- l'action des différents systèmes racinaires sur la structure du sol;
- le travail du sol.

2.2.5. Parcellaire et assolement

La taille et la répartition des parcelles peuvent permettre de réduire l'érosion. En effet, un parcellaire morcelé permet une diversification des cultures le long d'un même versant et favorise l'alternance entre les parcelles où l'eau pourra s'infiltrer et être dispersée et celles où la situation sera plus critique (Biji, 2012). Une bonne organisation du parcellaire doit permettre d'éviter que des surfaces importantes soient fortement dégradées et génèrent du ruissellement lors de la préparation des semis dans les parcelles en aval. Un parcellaire diversifié peut permettre de choisir des assolements en fonction des caractéristiques des parcelles (sensibilité à l'érosion, position sur le versant...) (Biji, 2012).

2.2.6. L'entretien humique et calcique des sols

L'ensemble des éléments qui peuvent améliorer la stabilité structurale des sols est susceptible de limiter leur sensibilité à l'érosion. Les amendements calcaires et humifères peuvent améliorer la résistance des sols, lorsque leurs teneurs en matière organique et en calcium sont particulièrement faibles. En améliorant la stabilité structurale, ils limitent la battance et la prise en masse des couches labourées, ce qui augmente les capacités d'infiltration du sol (Biji, 2012).

