

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun –Tiaret
Faculté Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Nutrition et Technologie Agro-Alimentaire

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences agronomiques

3^{ème} Année Licence : Sol et Eau

Polycopié de cours

« Conservation des sols »

Présenté par : Dr. BENAHMED Mohamed.

Année Universitaire : 2020-2021

TABLE DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

Préface.....	01
I. Introduction.....	02
II. Dégradation des sols, processus et facteurs.....	02
II.1. Définition.....	02
II.2. Effets visibles de l'érosion.....	03
II.2.1. Erosion en nappe.....	03
II.2.2. Erosion linéaire.....	04
II.2.3. Erosion par ravinement.....	04
II.2.4. Erosion régressive.....	05
II.3. Processus et facteurs de dégradation des sols.....	07
III. L'érosion hydrique.....	07
III.1. Définition.....	07
III.2. Origine et mécanismes.....	08
III.2.1. Origine.....	08
III.2.1.1. Origines naturelles.....	08
III.2.1.2. Origines anthropique.....	08
III.2.2. Mécanismes.....	09
III.2.2.1. Le détachement.....	09
III.2.2.2. Le transport.....	13
III.2.2.3. La sédimentation ou dépôt.....	13
III.3. Formes de l'érosion hydrique.....	14
III.3.1. L'érosion en nappe ou aréolaire ou laminaire "sheet erosion".....	14
III.3.2. L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill Erosion).....	15
III.3.2.1. L'érosion en griffes (RILL EROSION).....	15
III.3.2.2. L'érosion en rigoles.....	15
III.3.2.3. L'érosion en ravines (GULLY EROSION).....	16
III.3.2.4. Ravinement généralisé (BADLANDS).....	19
III.3.3. L'érosion en masse.....	19
III.3.3.1. Les glissements lents (Creep).....	20
III.3.3.2. Les glissements rapides (en planche).....	20

III.3.3.3. Les versants moutonnés.....	20
III.3.3.4. Coulées boueuses (laves torrentielles).....	21
III.3.3.5. Les glissements rotationnels.....	21
III.3.3.6. Les causes et les processus des mouvements de masse.....	21
II.3.4. Suffosion (tunneling).....	22
III.4. Les types de dégât.....	22
III.4.1. Effets de l'érosion hydrique.....	22
III.4.2. Effet de l'érosion hydrique sur la production agricole.....	23
III.5. Les facteurs de l'érosion hydrique.....	24
III.5.1. Facteurs naturels.....	24
III.5.1.1. Climat.....	24
III.5.1.2. La nature du sol.....	26
III.5.1.2.1. Composition Intrinsèques du sol.....	26
III.5.1.2.2. La nature d'un sol.....	27
III.5.1.3. Couvert végétal.....	28
III.5.1.4. La topographie (La morphologie du terrain).....	28
III.5.2. Facteurs anthropique.....	29
III.6. Estimation des pertes de terres (Quantification de l'érosion hydrique).....	32
III.6.1. Les mesures directes.....	32
III.6.1.1. Mesures topographiques.....	32
III.6.1.2. Simulation de pluie.....	32
III.6.1.3. Mesures par l'étude du transport solide.....	33
III.6.1.4. Mesures par l'étude de la sédimentation dans les retenues.....	35
III.6.2. Les mesures indirectes.....	35
III.6.2.1. La modélisation.....	35
III.6.2.2. La télédétection et le système d'information géographique.....	35
III.6.2.2.1. L'utilisation de l'imagerie satellitaire.....	36
III.6.2.2.2. L'intérêt du système d'information géographique (SIG).....	36
III.6.2.3. Utilisation des radioisotopes : le césium-137.....	37
III.7. Méthodes de prévention et de lutte.....	37
III.7.1. Les méthodes physiques.....	37
III.7.1.1. Les cordons en pierres.....	37
III.7.1.2. Les murettes.....	38

III.7.1.3. Les terrasses.....	39
III.7.1.4. Les gabions.....	39
III.7.1.5. Les seuils en pierres sèches.....	40
III.7.1.6. Seuils en pierres cimentées.....	41
III.7.1.7. Banquettes.....	41
III.7.2. Les méthodes biologiques et les pratiques culturelles.....	42
III.7.2.1. Le reboisement et reforestation.....	42
III.7.2.2. Le paillage (mulching).....	42
III.7.2.3. Le billonnage.....	43
III.7.2.4. La rotation des cultures.....	44
III.7.2.5. Parcelle et assolement.....	44
III.7.2.6. L'entretien humique et calcique des sols.....	44
IV. Les procédés de contrôle du ruissellement.....	45
IV.1. Introduction.....	45
IV.2. Types de procédés de contrôle du ruissellement.....	45
IV.2. Les ouvrages courants.....	46
IV.2.1. Les terrasses (bench terraces).....	46
IV.2.2. Les rideaux ou terrasses progressives.....	46
IV.2.3. Les banquettes.....	46
IV.2.4. Les diguettes.....	47
IV.2.5. Les techniques de concentration du ruissellement.....	47
V. Dimensionnement des dispositifs de contrôle de ruissellement.....	47
VI. La lutte contre l'érosion en Ravine.....	47
VI.1. Débits de ruissellement.....	47
VI.2. Types de voies d'eau ou d'évacuation.....	48
VI.3. Traiter la ravine de l'aval vers l'amont.....	49
VI.4. Traiter le bassin versant amont.....	49
VI.5. Traiter de petits bassins versants.....	50
VII. Érosion éolienne.....	50
VII.1. Définition.....	50
VII.2. Origines et mécanismes de l'érosion éolienne.....	50
VII.2.1. Facteurs de l'érosion éolienne.....	50
VII.2.2. Les mécanismes de l'érosion éolienne.....	51

VII.2.1. La saltation.....	52
VII.2.2. La reptation en surface.....	52
VII.2.3. La suspension.....	52
VII.3. Effets de l'érosion éolienne.....	52
VII.3.1. Effets néfastes de l'érosion éolienne.....	52
VII.4. Estimation de l'érosion éolienne et méthode de prévention.....	53
VII.4.1. Estimation de l'érosion éolienne.....	53
VII.4.1.1. Mesures directes.....	53
VII.4.1.2. Mesures indirectes (La modélisation).....	54
VII.4.2. Méthode de lutte contre l'érosion éolienne.....	54
VII.4.2.1. Techniques de fixation des dunes.....	54
Références bibliographiques.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure 01 : Erosion en nappe.....	04
Figure 02 : Erosion linéaire (Rigoles).....	04
Figure 03. Erosion par ravinement (Ravine).....	05
Figure 04 : La désagrégation par éclatement.....	10
Figure 05 : Effet des gouttes de pluie (effet splash).....	11
Figure 06 : Effet splash.....	12
Figure 07 : Erosion en nappe.....	15
Figure 08 : Erosion linéaire (Rigoles).....	16
Figure 09 : Erosion par ravinement (Ravine).....	17
Figure 10 : Erosion par ravinement (Ravine).....	17
Figure 11 : Erosion en masse (Glissement).....	20
Figure 12. Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash.....	26
Figure 13 : Principales propriétés du sol influençant l'érosion hydrique.....	27
Figure 14 : Parcelles aménagées pour simulation de la pluie.....	33
Figure 15 : Parcelle expérimentale (Simulateur de pluie).....	33
Figure 16 : Les cordons en pierres.....	38
Figure 17 : Murette en pierre sèche.....	38
Figure 18 : Les terrasses.....	39
Figure 19 : Les seuils en gabion utilisées dans la fixation des ravines.....	40
Figure 20 : Les seuils en pierres sèches.....	40
Figure 21 : Seuils en pierres cimentées.....	41
Figure 22 : Banquette.....	42
Figure 23 : Le paillage.....	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 01. Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire.....	17
--	----

Préface

La conservation des sols combine toutes les méthodes de gestion et d'utilisation des terres qui préviennent la diminution ou la détérioration des sols par des causes naturelles ou humaines. Combat contre la dégradation des ressources en eau et sol. Elle implique également la défense et la restauration des sols par la mise en place d'un ensemble de groupes et pratiques de conservation (FAO, 2014).

Les taux d'érosion du sol sont beaucoup plus élevés que les taux de formation du sol. Le sol est une ressource limitée, ce qui signifie que sa perte et sa dégradation ne peuvent être récupérées à l'échelle d'une vie humaine.

L'érosion des sols diminue la productivité agricole, dégrade les fonctions des écosystèmes, amplifie les risques hydrogéologiques tels que les glissements de terrain ou les inondations, entraîne des pertes importantes de biodiversité, endommage les infrastructures urbaines et, dans les cas graves, peut être la cause de déplacement de populations humaines (FAO, 2019).

Objectifs pédagogiques du cours

La dégradation des sols se traduit par l'érosion et la perte de fertilité des sols. Aujourd'hui, la dégradation des sols contribue non seulement à l'appauvrissement des écosystèmes, mais elle met en danger la qualité de vie.

Plusieurs types de dégradation qui peuvent affecter le sol, le cours de conservations des sols mettra l'accent essentiellement sur un type de dégradation physique qui affecte les sols : l'érosion.

Ce cours de conservation des sols est destiné aux étudiants de la 3^{ème} année licence sciences agronomique spécialité Sol et Eau, Master écosystèmes steppiques et sahariens et agroécologie.

I. Introduction

Le sol est l'épiderme, la couche superficielle de la terre, épaisse de quelques millimètres à plusieurs dizaines de mètres. Il recouvre les deux tiers des terres émergées mais seules 22% de ces dernières sont cultivables (soit seulement 5,5% de la surface totale de la planète).

Le sol est un milieu poreux avec des caractéristiques variables dans l'espace et dans le temps. C'est un système ouvert c'est-à-dire que le sol représente un volume qui du point de vue thermodynamique est ouvert. Il existe des échanges de matière et d'énergie entre ce volume et son environnement.

La dégradation des sols est un phénomène naturel inhérent aux processus physico-chimiques et biologiques qui dynamisent notre planète. Le devenir géologique des sols est compromis par l'existence de facteurs exogènes qui concourent tôt ou tard à leur destruction. Mais l'homme a toujours été un facteur de dégradation des sols et ceci dès le Néolithique. Il advient que son action se superpose à des processus naturels qui vont parfois dans le même sens (car la nature est par essence minimale). L'érosion provoque des dégâts aux terres agricoles mais aussi des conséquences néfastes au-delà du sol lui-même puisqu'elle entraîne la détérioration de la qualité des eaux et le déplacement des sédiments provoquant l'envasement des ouvrages hydrauliques.

II. Dégradation des sols, processus et facteurs

II.1. Définition

La dégradation des sols est un processus qui décrit les phénomènes dus à l'homme et/ou à l'agressivité climatique qui abaisse la capacité actuelle et/ou future à supporter la vie humaine.

C'est en quelque sorte une situation où l'équilibre entre l'agressivité climatique et le potentiel de résistance du sol a été rompue par l'action de l'homme (FAO, 2014).

Parmi les différents types de dégradation des sols on peut citer :

- **Dégradation biologique**

Elle concerne la réduction de la couverture végétale, la baisse de la quantité de biomasse, le déclin de la qualité et de la composition des espèces et les effets néfastes des incendies (FAO, 2014).

- **Dégradation chimique**

Elle englobe le lessivage des bases et l'apparition de phénomènes toxiques avec comme manifestation une baisse de la fertilité et une réduction de la teneur en matière organique du sol (FAO, 2014).

- **Dégradation Physique**

Elle a rapport avec la détérioration de la structure du sol par piétinement ou par le poids et/ou l'utilisation fréquente de machines. Cette situation entraîne des modifications défavorables des propriétés du sol, notamment de la porosité, de la perméabilité, de la densité apparente (FAO, 2014).

Erosion Eolienne : Phénomène de dégradation du sol sous l'action du vent qui arrache, transporte et dépose des quantités importantes de terre. Elle inclut également les effets abrasifs des particules pendant qu'elles sont transportées.

Erosion Hydrique : Ensemble de processus complexes et interdépendants qui provoquent le détachement et le transport des particules de sol vers un lieu de dépôt. C'est la perte de la couche arable du sol / érosion de surface sous l'action de l'eau.

- **Degré de dégradation des sols**

Le degré de dégradation des sols est défini comme l'intensité du processus de dégradation des terres (FAO, 2014).

- **Léger** : Quelques indications de dégradation sont visibles, mais le processus est encore dans sa phase initiale.

- **Modéré** : Elle est apparente mais le contrôle et la totale réhabilitation du sol sont encore possibles avec des efforts considérables.

- **Fort** : Les changements de propriétés des terres sont importants et leurs restaurations sont très difficiles dans des limites de temps.

- **Extrême** : Les dégradations vont au-delà d'une restauration possible.

II.2. Effets visibles de l'érosion

II.2.1. Erosion en nappe

- L'érosion en nappe est le mouvement du sol éclaboussé (inondé) résultant de la destruction de la structure du sol suivi du ruissellement.

▪ L'érosion en nappe a un effet érosif maximal au sommet des versants ou à l'aval d'un obstacle. Au bas des versants, au contraire, il s'agit d'accumulation.



Figure 01 : Erosion en nappe (Jérôme P, 2010).

II.2.2. Erosion linéaire

▪ Les griffes, micro-filets ou fines rigoles représentent des dépressions suffisamment petites pour pouvoir être supprimées par les façons culturales. Elles sont formées par l'eau, particulièrement en haut des pentes, sur le bord des pistes ou dans les champs sillonnés par les labours.

▪ Sur le terrain, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.



Figure 02 : Erosion linéaire (Rigoles) (Jérôme P, 2010).

II.2.3. Erosion par ravinement

▪ La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. Cette rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion.

Les ravines peuvent atteindre des dimensions considérables, et leur approfondissement remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive).

▪ Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands" et provoquer également la sape d'ouvrages (ponts, radiers, digues filtrantes...).



Figure 03. Erosion par ravinement (Ravine) (Jérôme P, 2010).

II.2.4. Erosion régressive

▪ En terrain argileux ou schisteux, après une forte pluie, les eaux empruntent les fissures du sol, les élargissent progressivement en chenaux parallèles qui fusionnent par écroulement des crêtes qui les séparent.

▪ En même temps, les têtes des chenaux reculent vers l'amont (érosion régressive). Ce processus est responsable de la formation des "bad lands".

▪ Les pavages (dallages) de pierres laissés en surface, une fois les particules les plus fines du sol emportées par le ruissellement, observés dans un grand nombre de champs labourés et de terrains de pâture.

❖ Les buttes de sol résiduel, où sont perchées des touffes d'herbes.

❖ L'accumulation de terre au-dessus des arbres, des pierres, des palissades et des haies sur terrains en pente.

❖ Les racines d'arbres et arbustes, exposées à l'air, ou mises à nu dans des cours d'eau, résultats d'une dispersion du sol ou d'un accroissement de ruissellement suite à la dégradation de bassins versants.

❖ Les dépôts de sols sur les pentes douces, ou de graviers, sables et limons, dans les lits de cours d'eau résultent d'une érosion en amont.

❖ Le déplacement du sol par piétinement du au pâturage sur les pistes à bétail au long des courbes de niveau, où les animaux font progressivement glisser la terre en bas de la pente.

❖ Les mouvements du sol sous l'action du vent, mis en évidence surtout par la formation de dunes.

❖ Des modifications de la flore (des buissons se substituant à l'herbe), survenant après surpâturage, et accompagnés souvent d'érosion.

❖ Les atterrissements dans les retenues de barrages, lacs et étangs.

▪ **Conséquences socio-économiques**

❖ Baisse croissante des rendements ;

❖ L'envasement des barrages, des canaux et systèmes de drainage et par conséquent, la réduction des stocks de poissons ;

❖ Les inondations dues aux eaux de ruissellement par suite de la réduction de la capacité d'infiltration des sols dégradés, et la baisse de niveau ou assèchement des nappes et points d'eau à cause des pertes d'eau par ruissellement ;

❖ Les problèmes sanitaires et de qualité de la vie : un environnement dégradé n'offre que de mauvaises conditions de vie.

❖ Les besoins accrus de terre et de facteurs de production agricole.

❖ Les préjudices à la société et aux générations futures.

❖ Les problèmes sanitaires et de qualité de la vie : un environnement dégradé n'offre que de mauvaises conditions de vie.

❖ Les besoins accrus de terre et de facteurs de production agricole.

❖ Les préjudices à la société et aux générations futures.

II.3. Processus et facteurs de dégradation des sols

Les différents types d'érosion dépendent de la gravité qui agit sur l'eau (hydrique), sur les masses atmosphériques (éolienne), sur les masses de glace (glaciaire) et sur les solides (gravitaire). Les trois processus sont :

- **Le détachement ;**
- **Le transport ;**
- **Le dépôt.**

Le type de dégradation d'un sol se réfère au processus qui cause la dégradation (déplacement du matériau sol par l'eau et le vent, détérioration in situ par des processus physiques, chimiques et biologiques) ; on peut en distinguer deux catégories.

- **La dégradation par déplacement du matériau sol.**
- **La dégradation par détérioration interne du sol.**

Si le couvert végétal disparaît, que ce soit pour la culture ou à la suite de surpâturage, d'incendies ou d'aléas climatiques, des changements vont subvenir dans le sol. La vitesse de ce changement dépend de la température, de la topographie, des précipitations, du sol lui-même et du mode d'aménagement.

En général sous climats chauds, surtout quand les résidus agricoles sont enlevés et que le fumier animal (engrais, compost) ne retourne pas à la terre, la teneur en matière organique tombe au-dessous de 0,5 %, la structure des sols et leur fertilité se détériorent, l'eau des pluies colmate la surface des sols, l'infiltration diminue, le ruissellement et l'érosion démarrent, puis s'accélèrent. L'homme et le climat sont les facteurs causaux de la dégradation des sols, la nature même de ceux-ci conditionnant cependant le degré et la vitesse de dégradation.

III. L'érosion hydrique

III.1. Définition

Erosion vient de "ERODERE", verbe latin qui signifie "ronger" (Rampon, 1987). L'érosion ronge (érode) la terre. En fait, c'est un processus naturel qui n'est donc pas forcément souhaitable de l'arrêter, mais de le réduire à un niveau acceptable et tolérable. L'érosion est un processus provoquant une perte importante de sol.

❖ Désagrégation et l'érosion

- La désagrégation est la décomposition de la roche en sédiments.
- L'érosion est la désagrégation suivit par le transport des sédiments a la surface terrestre.

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.

❖ 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, R et *al*, 1980).

En agriculture, amincissement de la couche arable d'une parcelle sous l'effet d'un arrachement/entraînement de particules solides par les forces érosives de l'eau, du vent ou les pratiques de travail du sol.

En relation avec les précipitations et le ruissellement sur les terres, l'érosion hydrique des sols se définit au sens strict comme un transport de matière solide entre des zones de départ de terre et des zones de dépôt bien distinctes dans l'espace.

III.2. Origine et mécanismes

III.2.1. Origine

III.2.1.1. Origines naturelles

Les principales causes naturelles de l'érosion sont la pente naturelle (ou gravité) : les eaux courantes (érosion hydrique ; les glaciers (érosion glaciaire) ; les vagues et les marées (érosion marine) ; les variations des conditions météorologiques, en particulier les variations de précipitation.

III.2.1.2. Origines anthropique

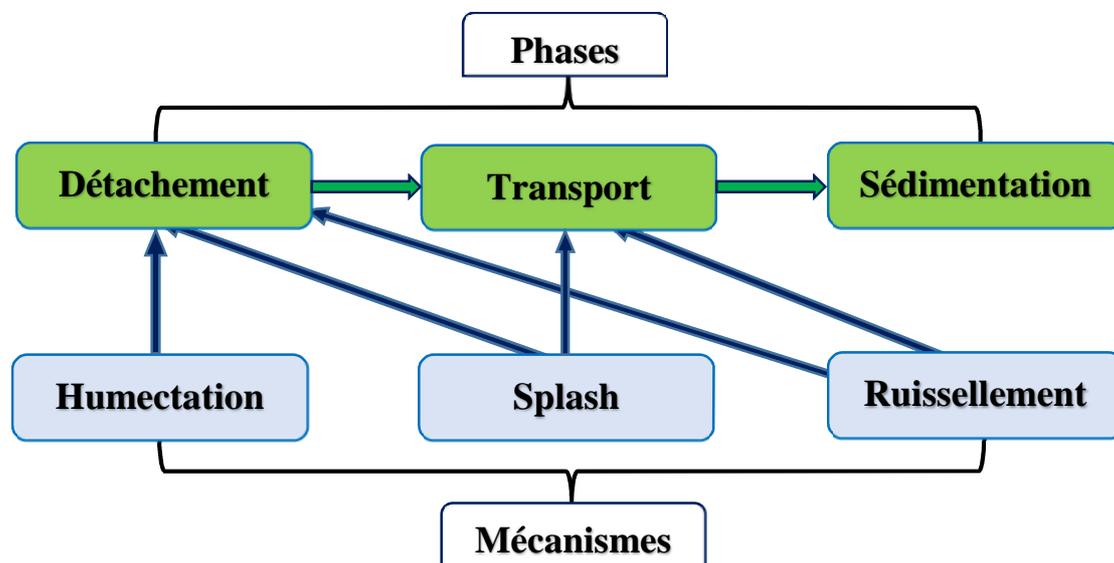
L'extension des villes, la construction de routes, l'aménagement des cours d'eau, en somme l'aménagement du territoire, augmentent les risques d'érosion. A cela, s'ajoute l'agriculture (les zones cultivées fragilisent le sol, en raison du travail

mécanique intensif sur les sols), les déboisements et la déforestation qui entraînent des sols nus et augmentent l'érosion par les eaux de ruissellement et par le vent.

III.2.2. Mécanismes

Les mécanismes provoquant l'érosion sont liés à l'énergie de la pluie ou à l'énergie de l'écoulement de l'eau. On envisage que l'érosion hydrique se produit en trois phases, soit :

- D'arrachement et le détachement des particules de la surface du sol ;
- De transport ;
- De dépôt ultérieur (sédimentation).



III.2.2.1. Le détachement

Le détachement, dans le cas de l'érosion hydrique, est principalement le fait de l'impact des gouttes de pluie et du ruissellement. Les deux ont le potentiel de détacher et de transporter les sédiments.

La pluie exerce son pouvoir érosif sur toute la région où elle tombe tandis que le ruissellement n'est vraiment actif que lorsqu'il est concentré ce qui diminue de beaucoup la surface touchée. Chaque goutte de pluie qui tombe est érosive, le ruissellement, par contre, n'a que peu d'effets tant que des milliers voire des millions de gouttelettes ne sont pas concentrées.

La pluie et le ruissellement doivent donc être considérés comme des processus différents mais interdépendants.

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont :

❖ **L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies** : Les quatre processus qui peuvent être identifiés comme responsables de la désagrégation sont :

▪ **L'éclatement**, correspondant à la désagrégation par compression de l'air piégé lors de l'humectation. L'intensité de l'éclatement dépend entre autres, du volume d'air piégé, donc de la teneur en eau initiale des agrégats et de leur porosité.

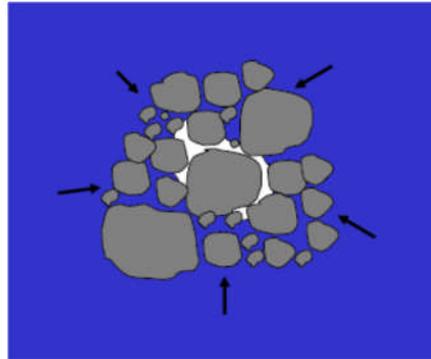


Figure 04 : La désagrégation par éclatement.

▪ **Le gonflement différentiel**. Ce phénomène intervient suite à l'humectation et la dessiccation des argiles, entraînant des fissurations dans les agrégats. L'importance de ce mécanisme dépend en grande partie de la teneur et de la nature de l'argile des sols.

▪ **La dispersion physico-chimique**. Elle correspond à la réduction des forces d'attraction entre particules colloïdales lors de l'humectation. Elle dépend de la taille et la valence des cations (particulièrement du sodium) pouvant lier les charges négatives dans le sol.

▪ **La désagrégation mécanique** sous l'impact des gouttes de pluie (= Détachement par **spalsh**). L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats et surtout détacher les particules de leur surface. Ce mécanisme intervient en général conjointement aux autres mécanismes cités précédemment et nécessite une pluie d'une certaine énergie qui est variable selon les sols. L'énergie cinétique des gouttes n'est plus absorbée mais est transformée en force de cisaillement qui provoque détachement et splash.

Cette action combinée de détachement et déplacement par splash des gouttes d'eau est probablement la raison pour laquelle on l'a souvent considéré comme le seul processus à l'origine de la battance et de l'érosion. Cependant, il ne faut pas

forcément assimiler splash et dégradation structurale car le splash peut dans certains cas déplacer des agrégats sans qu'aucune désagrégation n'intervienne. Les particules détachées par les gouttes de pluie sont généralement des micro-agrégats ou des particules élémentaires < 100 μ m.

La taille et l'impact des gouttes sont des facteurs importants dans ce processus de destruction et d'arrachement (éclaboussement par effet splash).

L'énergie d'une seule goutte de pluie cause une érosion par éclaboussement ou rejaillissement qui peut déplacer les particules sur quelques dizaines de cm, la distance dépendant de la masse des particules et de l'angle d'incidence des gouttes de pluies par rapport à la surface. La masse de sol détachée peut être de l'ordre de plusieurs dizaines de tonnes par hectare et par an.

L'énergie cinétique des gouttes qui tombent est généralement utilisée comme paramètre pour déterminer le pouvoir érosif des pluies. Cette énergie cinétique peut être très élevée dans les régions humides ou semi-arides.

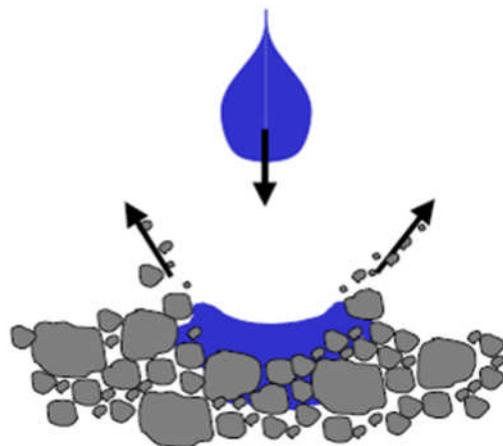


Figure 05 : Effet des gouttes de pluie (effet splash).

Les particules de sol pulvérisées entrent facilement en suspension dans la lame d'eau à la surface du sol et elles ont deux choix :

- Si l'eau s'infiltré, elles seront déposées et formeront une croûte (phénomène de battance) qui deviendra peu perméable lors de la prochaine précipitation.
- Si l'eau ruisselle, elles seront, pour un grand nombre, emportées par l'eau et le processus dynamique d'érosion est amorcé.

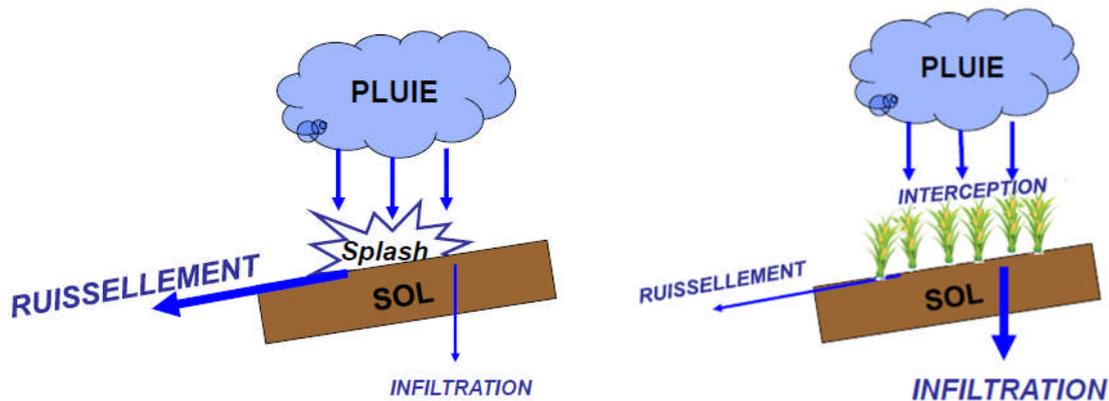


Figure 06 : Effet splash (Darboux F. 2009).

Les particules de sol très fines qui sont détachées de la surface par l'impact des gouttes sont piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration (battance). Cette obstruction augmente les risques d'érosion et de ruissellement en surface. Les sols limoneux sont particulièrement touchés par ce phénomène. La croûte de battance ainsi formée s'épaissit dans les petites dépressions où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. La perméabilité de la surface peut descendre en dessous de 2 mm/h en période humide. Le micro relief s'estompe et le sol perd toute capacité de rétention d'eau superficielle. Lorsque la croûte de battance est formée, les pluies ultérieures, même si elles sont de faible intensité, engendreront du ruissellement.

❖ **Le ruissellement**

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la parcelle en emportant les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excédent apparaît soit lorsque l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (ruissellement "Hortonien"), soit lorsque la pluie arrive sur une surface partiellement ou totalement saturée par une nappe (ruissellement par saturation).

Ces deux types de ruissellement apparaissent généralement dans des milieux très différents, bien que l'on observe parfois une combinaison des deux. Une fois le ruissellement déclenché sur la parcelle, l'érosion peut prendre différentes formes qui se combinent dans le temps et dans l'espace pouvant donner naissance soit une érosion diffuse et /ou soit une érosion concentrée.

Il est donc à noter qu'il y a détachement par ruissellement lorsque la force de friction de l'eau sur les particules du sol est supérieure à la résistance du sol au cisaillement comme schématisé sur le graphique suivant :

III.2.2.2. Le transport

Les particules arrachées peuvent être transportées par :

- **Suspension** : l'impact des gouttes de pluie sur la lame d'eau provoque une turbulence qui maintient les particules fines en suspension. Ces dernières sont alors transportées sur de grandes distances.

- **Saltation** : rencontré lorsque les particules sont de grosseur moyenne, elles peuvent se déplacer par sauts successifs (saltation) mais ce phénomène est surtout important avec le vent.

- **Roulement** : qui est marqué par un écoulement assez intense pouvant ainsi arracher des plus grosses particules mais ne pouvant les mettre en suspension. La force de l'écoulement les roule donc sur le fond.

Le transport est dû à la fois aux gouttes d'eau de pluie (**par rejaillissement = effet splash**) et aux eaux de ruissellement. Ainsi, le transport est assuré par ces eaux. Cependant, il est à signaler que le mode de transport par effet splash est généralement négligeable sauf sur pente forte. Alors que les eaux de ruissellement sont les plus responsables du transport des particules du sol détachées.

La quantité de terre transportée devrait théoriquement être fonction :

- Du temps d'apparition du ruissellement.
- Du volume d'eau de ruissellement (l'augmentation de la charge hydraulique).
- De la granulométrie du sol.

III.2.2.3. La sédimentation ou dépôt

C'est la phase finale du processus d'érosion, la sédimentation correspond au dépôt des particules transportées par le ruissellement en bas du versant et qui forment une couche élémentaire ou se déversent dans des cours d'eau (lacs et rivières). Ce sont les plus grosses qui se déposent en premier et les plus petites par la suite, la déposition survient lorsque le poids des particules devient plus important que les forces de transport conduisant à un ralentissement de la vitesse du transport de particules jusqu'à l'arrêt. La diminution de la pente du sol, la réduction de l'intensité de pluies

ou encore en présence d'obstacles tels les haies, les banquettes d'herbe, les graviers et les cailloux agissent aussi sur le ralentissement de la vitesse de transport des particules par ruissellement.

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et l'aval en fonction : **de leur dimension, de leur densité, de la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau.**

Les particules se déposent dans l'ordre suivant :

Elles se déposent en général dans l'ordre suivant : **Sable, 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.

III.3. Formes de l'érosion hydrique

III.3.1. L'érosion en nappe ou aréolaire ou laminaire "sheet erosion"

C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Cette érosion en nappe entraîne la dégradation du sol sur l'ensemble de sa surface, autrement dit c'est une forme d'érosion diffuse. De ce fait, elle est peu visible d'une année à l'autre.

Le signe le plus connu de l'érosion en nappe est donc la présence de plages de couleur claire aux endroits les plus décapés. Egalement, il y a un autre symptôme de l'érosion en nappe est la remontée des cailloux en surface par les outils de travail du sol. Les paysans disent que "les cailloux poussent". Il s'agit en réalité d'une fonte de l'horizon humifère et d'un travail profond du sol qui remonte en surface les cailloux. Après quelques pluies, les terres fines sont entraînées par les pluies tandis que les cailloux, trop lourds pour être emportés, s'accumulent à la surface du sol.

On parle d'érosion hydrique en nappe ou aréolaire (sheet érosion) parce que l'énergie des gouttes de pluie s'applique à toute la surface du sol et le transport des matériaux détachés s'effectue par le ruissellement en nappe. C'est le stade initial de la dégradation des sols par érosion (Roose E, 1994).

Elle se produit par des précipitations brutales (Vitesse de chute $V < 30$ cm/s) et elle provoque l'enlèvement plus ou moins uniforme d'une mince couche ou "nappe" de sol d'un champ lisse en pente faible non protégée (FAO, 1983).

L'importance de l'érosion en nappe dépend à la fois :

- De l'intensité maximale des pluies qui déclenchent le ruissellement,
- De l'énergie des pluies qui détachent les particules susceptibles de migrer,
- De la durée des pluies et/ou de l'humidité avant les pluies.



Figure 07 : Erosion en nappe (Jérôme P, 2010).

III.3.2. L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill Erosion)

L'érosion linéaire est exprimée par tous les creusements linéaires qui entaillent la surface du sol suivant diverses formes et dimensions (griffes, rigoles, ravines, etc.). En fait, L'érosion linéaire apparaît lorsque le ruissellement en nappe s'organise, En effet, sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les creux. A ce stade, les rigoles ne convergent pas mais forment des ruisselets parallèles.

III.3.2.1. L'érosion en griffes (RILL EROSION)

Les griffes se présentent dans le paysage comme des lignes parallèles le long des versants. Leurs tracés sont fins, elles ont une largeur de 10 cm et moins de 10 cm de profondeur environ, quant à la longueur, elle est surtout fonction de l'action des eaux et de la longueur des versants.

Les griffes sont formées au niveau des jachères nues, dans les parcelles travaillées. Elles sont effacées par les labours et les façons culturales (Roose E, 1994).

III.3.2.2. L'érosion en rigoles

Il s'agit de sillon qui se caractérise par une largeur comprise généralement entre 20 et 30 cm et d'autant en profondeur par contre la longueur est très variable, elle est liée à la longueur des versants. Les rigoles apparaissent surtout lors des grandes averses (on citera le cas des pluies torrentielles), qui s'effacent facilement lorsque le

paysan effectue un labour profond, néanmoins certaines rigoles échappent à la gomme des paysans sur les terres abandonnées, ce qui laisse dire que certaines rigoles peuvent évoluer en ravines voire même en ravins.

Quand la capacité d'arrachement des pluies augmente (V entre 30 et 60 cm/s), le sol s'érode de façon inégale et des petites rigoles, entaillant le sol sur plusieurs centimètres de profondeur apparaissent (FAO, 1976).



Figure 08 : Erosion linéaire (Rigoles) (Jérôme P, 2010).

III.3.2.3. L'érosion en ravines (GULLY EROSION)

Il s'agit d'une incision linéaire suivant le sens de la pente, dont la profondeur minimale est de 1m. Celle-ci peut atteindre 2 à 3 mètres. La ravine peut être classée comme ravin selon certaines descriptions. En ce qui concerne cette appréciation morphologique, elle n'est importante que dans la mesure où elle peut nous aider à appréhender le rythme de l'évolution de l'érosion linéaire d'une façon générale. Par contre la largeur peut avoir une dizaine de mètres quant à la longueur elle est très variable.

Pour des pluies plus intenses ($V > 60$ cm/s), des ravines se forment. Beaucoup d'entre elles ne sont, au début, que des voies de passage des troupeaux, des routes d'exploitation et des sentiers tracés sur des terrains en pente, (FAO, 1976).



Figure 09 : Erosion par ravinement (Ravine) (Jérôme P, 2010).



Figure 10 : Erosion par ravinement (Ravine) (Jérôme P, 2010).

Tableau 01. Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire.

Formes	Tracé	Longueur	Largeur	Profondeur
Griffe	Sinueux	< 1 m	< 10 cm	5-6 cm
Rill	Rectiligne	Centaine de m	10-20 cm	5-10 cm
Rigole	Sinueux	Dizaine de m	5-70 cm	10- 30 cm
Ravine	Peu sinueux	Centaine de m	50cm à 1 m	30-50 cm
Petit ravin	Peu sinueux	Centaine de m	50 cm à 1m	50-200 cm

La ravine est une rigole approfondie où se concentrent les filets d'eau. La rigole se transforme en ravine lorsque sa profondeur interdit son nivellement par des simples instruments aratoires. En d'autres termes, Le ravinement constitue un stade avancé de l'érosion linéaire.

Il y en a trois processus de ravinement :

a/ Dans la nature, on observe le plus souvent des ravines en forme de V qui s'impriment dans un matériau homogène, plus ou moins meuble, sablo-argileux; argileux, marneux ou schisteux. Les versants de ces ravines évoluent par altération de la roche : en saison froide par alternance de gelées et de soleil, en saison chaude, par alternance de périodes sèches et d'averses. On observe en milieu méditerranéen une altération des marnes et des schistes qui peut atteindre 4 à 10 mm par an. L'enfoncement a lieu lors des averses exceptionnelles. Une à deux averses par an suffisent pour dégager toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et pour entailler le fond de la ravine par abrasion des matériaux que le ruissellement charrie.

Au cours des saisons intermédiaires, les matériaux fins accumulés sur les versants par altération des roches, glissent jusqu'au fond de la ravine, d'une part suite à l'impact des gouttes de pluies, et d'autre part par formation de petites rigoles secondaires ou le plus souvent par glissement en masse des particules saturées par l'eau. La pente d'équilibre des versants étant largement dépassée, aucune végétation ne peut s'y installer. La lutte antiérosive va donc s'attacher à stopper le surcreusement du fond de la ravine et à rétablir la pente d'équilibre sur les versants.

b/ Un deuxième type de ravines en U s'observe fréquemment dans la nature sur des 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 (sapement de berges). Ici également il sera nécessaire de fixer le fond de la ravine, de retenir les sédiments jusqu'à obtenir une pente d'équilibre des versants. Dans les terrains de grande culture du bassin parisien, on peut aussi trouver des ravines en U emboîtées, développées dans des limons de cohésion croissante depuis le lit de semence, la zone labourée et la semelle de labour dans l'horizon B tassé non travaillé.

c/ Il existe une troisième forme de ravinement encore plus difficile à traiter: l'érosion en tunnel (tunneling). Elle peut se développer sur des 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 (fréquent dans le bassin méditerranéen).

Lors des orages de fin de 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 des 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 macroporosités.

L'érosion par ravinement est la forme culminante de l'érosion du sol. Les dégâts causés sont d'autant plus importants que la stabilisation et la réparation de cette forme d'érosion sont les plus coûteuses de tous les travaux de lutte contre l'érosion. L'approfondissement des ravines remonte du bas vers le haut de la pente (érosion régressive). Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en "badlands".

III.3.2.4. Ravinement généralisé (BADLANDS)

Il s'agit d'un ensemble de ravins et de ravines juxtaposées liés les unes aux autres par des lignes de crêtes aigües. C'est une forme plus organisée et hiérarchisée des chenaux. Le profil général, longitudinal est redressé. La pente est forte et régulière. Le versant est généralement dénudé. Les bad-lands représentent le stade ultime du ravinement.

A l'échelle de la ravine, Heusch (1982) a estimé que 70% du transport solide proviennent des sapements des berges. Cette forme d'érosion peut transformer le paysage en « badlands ».

III.3.3. L'érosion en masse

Les mouvements en masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. Elles marquent souvent une évolution très avancée, voire irréversible. En effet ils sont particulièrement fréquents dans les secteurs marneux. Les versants atteints par ces phénomènes présentent un paysage chaotique.

III.3.3.1. Les glissements lents (Creep)

C'est un glissement plus au moins lent des couches superficielles de la couverture pédologique, généralement sans décollement, qui s'observe assez généralement sur les pentes fortes. Grâce à la forme couchée des jeunes arbres forestiers et à la forme en crosse de la base des arbres adultes.

Les glissements sont des décollements d'une couche plus ou moins épaisse de sol, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement. Ce phénomène est très courant sur les schistes et sur les marnes en voie d'altération. Les glissements se produisent lorsque la contrainte de cisaillement dépasse la résistance du sol ou lorsque la limite de plasticité ou de liquidité est atteinte.



Figure 11 : Erosion en masse (Glissement) (Jérôme P, 2010).

III.3.3.2. Les glissements rapides (en planche)

Ce sont des décollements d'une couche plus au moins épaisse de sols, glissant sur un horizon plus compact (souvent de la roche altérée), servant de plan de glissement.

III.3.3.3. Les versants moutonnés

Ce sont des formes molles qui apparaissent dans des conditions humides lorsque les horizons superficiels dépassent le point de plasticité et progressent lentement, comme une pâte dentifrice, entre la trame de racine qui retient l'horizon de surface est l'horizon compact imperméable que représente l'altérité des marnes ou des argiles par exemple.

III.3.3.4. Coulées boueuses (laves torrentielles)

Ce sont des mélanges d'eau et de terre à haute densité ayant dépassé le point de liquidité et qui emportent à grande vitesse des masses considérables de boue et de blocs de roches de taille imposante. Les matériaux fins sont repris ultérieurement par l'érosion hydrique en nappe ou en rigole, laissant en place une masse de cailloux et de blocs de taille très hétérogène.

Les formes locales : Il s'agit d'éboulements rocheux 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 d'une ravine et font progresser la ravine vers le sommet de la colline par érosion régressive.

III.3.3.5. Les glissements rotationnels

Ce sont des glissements où la surface du sol et une partie de la masse glissent en faisant une rotation, de telle sorte qu'il apparaît une contrepente sur le versant.

III.3.3.6. Les causes et les processus des mouvements de masse

La cause des mouvements de masse provient d'une part, du déséquilibre entre la masse de la couverture pédologique, de l'eau qui s'y trouve stockée et des végétaux qui la couvrent et d'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur la roche altérée en pente sur lequel ils reposent.

Les facteurs des mouvements de masse qui favorisent ce déséquilibre sont les secousses sismiques, les fissurations suite à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche, l'humectation jusqu'à saturation de la couverture pédologique, l'humectation du plan de glissement qui devient savonneux (présence de limons issus de l'altération des micas), des roches présentant des plans de clivage ou de fracture préférentiels (argillites, marnes, schistes, roches micassées, gneiss). L'homme peut accélérer la fréquence de ces mouvements de masse en modifiant la géométrie externe du versant (par terrassement, creusement d'un talus pour installer une route ou des habitations, surcharge d'un versant par des remblais, modification des écoulements naturels, érosion au pied d'un versant par une rivière dont le cours est modifié, etc.). La végétation intervient également.

III.3.4. Suffosion (tunneling)

C'est un soutirage qui forme généralement des crevasses élargies débouchant dans des ravins et interrompu en surface par des petits ponts naturels.

Il donne dans ce cas des "niches de soutirage" à la tête de ces ravines. D'une série de trous alignés, on passe au ravin.

Ces trous se localisent généralement sur des pentes moyennes dans des formations marneuses, à couverture végétale clairsemée ou dans des champs cultivés. Ce sont des trous de 0,5 à 1 m de profondeur et d'autant de diamètre. (Belgharbi et Sadat, 1994).

III.4. Les types de dégât

III.4.1. Effets de l'érosion hydrique

❖ Sur le terrain

Les répercussions de l'érosion des sols vont au-delà de la perte de sol arable. La levée, la croissance et le rendement des cultures sont directement affectés par l'appauvrissement du sol en éléments nutritifs et en engrais. L'érosion peut déplacer ou carrément emporter les semences et les plants. Du fait de leur légèreté, la matière organique présente dans le sol, les résidus à la surface et le fumier épandu peuvent facilement être emportés hors du champ, particulièrement à la fonte des neiges, et entraîner avec eux des pesticides.

Les pertes de sol peuvent nuire à la qualité, à la structure, à la stabilité et à la texture du sol. Le morcellement des agrégats et l'enlèvement des particules plus fines ou de couches entières de sol ou de matière organique peuvent détériorer la structure et même modifier la texture du sol. Toute modification de la texture du sol peut à son tour nuire à la capacité de rétention d'eau du sol et exposer davantage celui-ci à des conditions extrêmes telles que la sécheresse.

❖ Hors du champ

Les répercussions de l'érosion hydrique ne sont pas toujours aussi apparentes hors du champ que sur les lieux mêmes où elle se produit. Le sol érodé, déposé au bas des pentes, empêche ou retarde la germination, enterre les jeunes pousses et oblige à ressemer les zones dégarnies. De plus, des sédiments peuvent s'accumuler au bas des pentes et contribuer à la détérioration des routes.

Les sédiments qui atteignent des cours d'eau peuvent accélérer l'érosion des berges, ensabler les fossés de drainage et les cours d'eau, envaser les réservoirs, endommager l'habitat des poissons et dégrader la qualité de l'eau en aval. Les pesticides et engrais, souvent emportés avec les particules de sol, contaminent ou polluent les sources d'eau, les terres humides et les lacs en aval. Du fait de la gravité de certaines des répercussions de l'érosion hors du champ, la pollution diffuse de source agricole est un point important à considérer.

L'érosion hydrique entraîne des conséquences tant en amont qu'en aval des bassins versants.

En amont : par

- Des pertes en terre ;
- Des pertes en matière organique et en éléments nutritifs notamment l'azote et le phosphore ;
- Dégradation de structure du sol.

En aval : par

- L'augmentation du ruissellement et l'entraînement des particules du sol ;
- Les coulées de boues ;
- Inondations ;
- Sapements de chaussées ;
- Colmatages des réseaux d'assainissement et des ouvrages de retenue des eaux pluviales ;
- Envasements des cours d'eau.

III.4.2. Effet de l'érosion hydrique sur la production agricole

L'érosion du sol inhibe notre capacité à produire des produits agricoles, en diminuant les éléments nutritifs disponibles pour les plantes ainsi que l'espace dont elles disposent pour s'enraciner, l'érosion du sol peut réduire le rendement des cultures jusqu'à 50%.

L'érosion affecte la production agricole, car elle provoque des dégâts très souvent irréversibles. En effet, toute perte de sol induit une perte de la matière organique des sols (MOS) et de nutriments et une diminution de la capacité de rétention en eau du sol. Les dégâts s'étendent également au-delà de la zone touchée

par l'érosion : coulées d'eau et de sédiments dans les parcelles voisines, endommagement d'infrastructures ou pollution de cours d'eau.

L'érosion contribue aussi à la perte et le décapage de la couche arable, la plus fertile du sol, diminuant sa productivité et dégradant la qualité des eaux de surface.

❖ **Diminution du bilan hydrique :**

- Par l'effet de battance qu'elle provoque, la pluie devient de moins en moins profitable à la plante. En effet une fraction importante de la pluie ruisselle.

- La réduction du volume de sol exploitable par les racines augmente la sensibilité de la culture aux périodes sèches.

❖ **Sol pauvre en éléments fertilisants**

- La fraction du sol emportée par l'érosion est fréquemment plus riche que le sol dans son ensemble.

- Le sol laissé sur place se désagrège et devient hostile voir inculte (pas de vie biologique, hétérogénéité de levée, baisse de la production ...).

❖ **Terre inaccessible (bad-lands)**

- A travers la formation de ravines, le terrain peut évoluer en badlands rendant impossible tout accès à la terre.

III.5. Les facteurs de l'érosion hydrique

Les précipitations, le couvert végétal, la pente, le type de sol et l'action de l'homme sont les facteurs majeurs qui régissent l'érosion des sols.

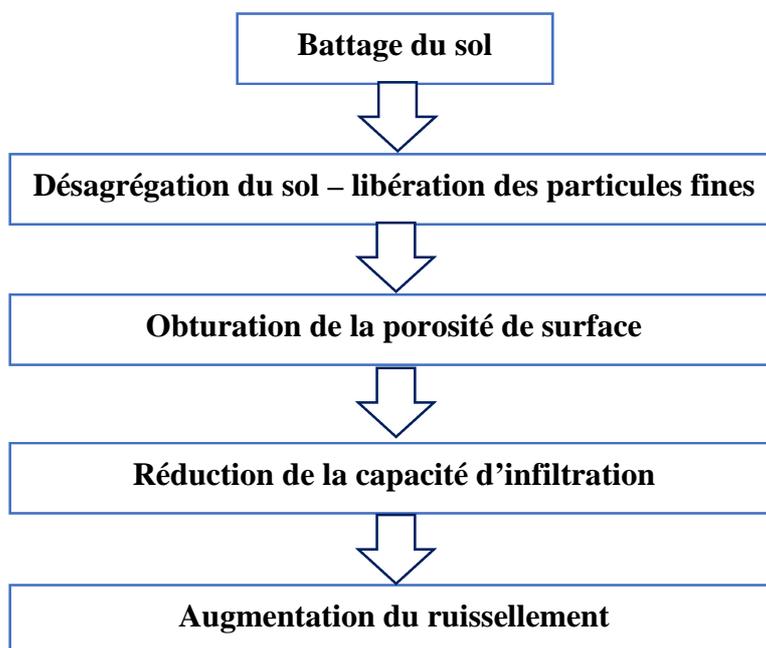
III.5.1. Facteurs naturels

III.5.1.1. Climat

Le climat représente l'élément moteur de l'érosion hydrique par les pluies. Sans précipitation atmosphérique il n'y a pas d'érosion hydrique. La hauteur des précipitations a peu d'influence sur l'érosion ; c'est leur intensité qui va provoquer l'effet de battage du sol (ou battance).

Les **précipitations** atmosphériques sont la principale cause de l'érosion hydrique, elles sont caractérisées par la hauteur des averses, l'intensité et la fréquence.

La **pluie** désagrège les agrégats et mottes en éléments fins susceptibles d'être entraînés par le ruissellement favorisant le colmatage et limitant l'infiltration.



L'intensité de la pluie et son énergie jouent le rôle important sur l'érosion. Le volume de précipitation joue un rôle similaire. En général, un plus grand volume de précipitation provoque un plus grand volume de ruissellement et nécessairement une plus grande érosion.

Une longue période sans pluie augmente les capacités de stockage du sol et d'absorption de la précipitation et diminue le ruissellement et l'érosion. Tous les facteurs qui influencent positivement l'évapotranspiration contribuent à diminuer le potentiel d'érosion. Une mauvaise répartition des précipitations provoque une concentration de celles-ci qui augmentent le volume de ruissellement et le potentiel d'érosion.

L'érosivité d'une pluie sera fonction de ses caractéristiques physiques : le diamètre des gouttes et la vitesse d'impact des gouttes. Ainsi selon les régions et les saisons, l'érosivité des pluies sera plus ou moins prononcée.

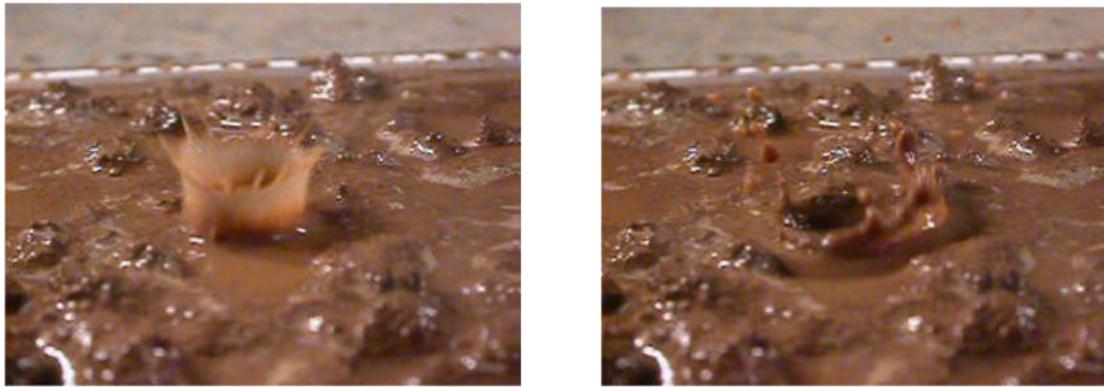


Figure 12. Rejaillissement du sol et de l'eau suite à l'impact d'une goutte d'eau ou effet splash (Leguédou S, 2003).

III.5.1.2. La nature du sol

Le facteur sol le plus important est la résistance (stabilité) des agrégats à l'impact des gouttes de pluie. Cette résistance ou cette stabilité est influencée positivement par la présence d'agents liants tels que les argiles, la matière organique et le calcium.

La porosité du sol influence indirectement le potentiel d'érosion des sols. Une plus grande porosité favorise une plus grande infiltration et un volume de ruissellement moindre, ce qui diminue les possibilités d'érosion. Lorsque le sol possède une plus grande capacité de stockage de la pluie, cela diminue le volume de ruissellement et l'érosion.

L'érodibilité d'un sol représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent. L'érodibilité d'un sol est définie par deux caractéristiques :

- ❖ La résistance au splash (battance) ;
- ❖ La résistance au cisaillement (lié au ruissellement).

III.5.1.2.1. Composition Intrinsèques du sol

La structure et la texture déterminent en partie la capacité d'infiltration du sol (un horizon très riche en argile pourra limiter l'infiltration, par exemple) et, de même que pour le tassement, la sensibilité de celui-ci à l'érosion dépend aussi de sa stabilité structurale, principalement assurée par la matière organiques et l'argile.

La granulométrie : les sols limoneux sont les plus à risque ;

La structure : les sols structurés en agrégats stables et compacts seront les moins à risque ;

L'humidité : plus le sol est humide plus il y a propension au détachement et au risque de transport des particules détachées (Dautrebande S., et *al.*, 2006).

Dans une moindre mesure, un taux élevé de matière organique limite le risque d'érosion.

III.5.1.2.2. La nature d'un sol

L'érodibilité d'un sol représente la sensibilité d'un sol à l'arrachement et au transport des particules qui le composent. L'érodibilité d'un sol est définie par sa résistance au splash (ou battance) et sa résistance au cisaillement (lié au ruissellement). Elle est fonction de plusieurs paramètres :

- La capacité d'infiltration,
- La stabilité structurale,
- La texture (sensibilité plus forte des sols sableux),
- La teneur en matière organique (la matière organique joue un rôle de ciment pour les agrégats du sol, il y aura de même un effet de synergie entre argile et matière organique).

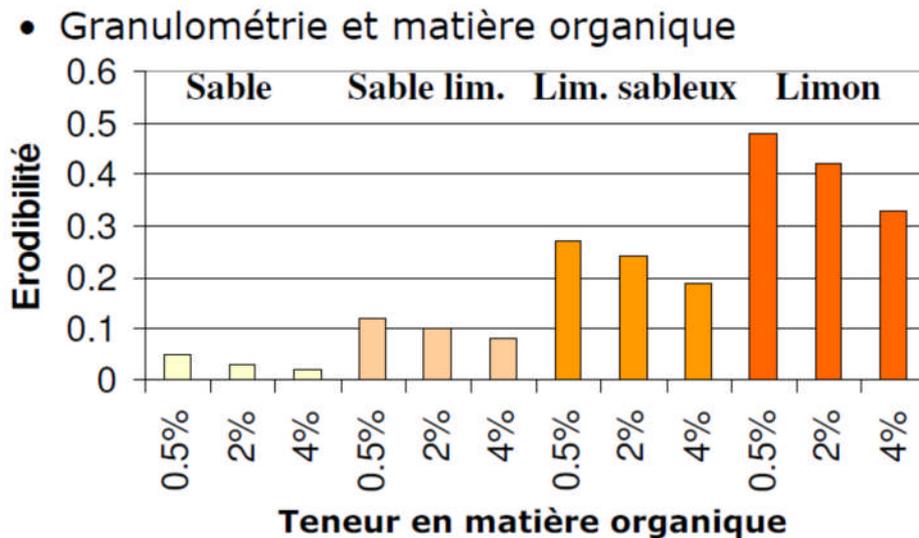


Figure 13 : Principales propriétés du sol influençant l'érosion hydrique (Bielders C. 2004).

III.5.1.3. Couvert végétal

La végétation diminue la capacité érosive de la pluie et permet l'infiltration de l'eau en diminuant le volume d'eau sur la surface du sol.

Sur un sol nu, ce sont les particules de sol qui absorbent directement l'énergie des gouttes de pluie. Par contre, un couvert végétal peut absorber une partie importante de l'énergie de la pluie.

Le système racinaire enlace considérablement les agrégats et accroît considérablement leur résistance à l'arrachement. De plus, les racines sont un excellent apport de matière organique pour le sol, ce qui augmente la porosité du sol, augmente l'infiltration et diminue le ruissellement.

La végétation possède un taux d'évapotranspiration supérieur à celui d'un sol nu, ce qui contribue à diminuer les réserves en eau du sol et augmente sa capacité de stockage pour la pluie suivante. Le ruissellement potentiel et l'érosion seront alors moindres.

Face à l'érosion, la végétation joue plusieurs rôles : elle absorbe l'énergie de la pluie, protège le sol et influence positivement les propriétés physiques du sol.

❖ L'absence de végétation

La végétation est le facteur primordial de protection du sol contre l'érosion. L'action de la végétation est multiple :

- L'interception des gouttes des pluies permet la dissipation de l'énergie cinétique, ce qui diminue dans une large mesure l'effet « splash »,
 - Son système racinaire maintient le sol en place et y favorise l'infiltration,
 - Accessoirement, l'évapotranspiration de la plante en asséchant le sol augmente sa capacité d'infiltration,
 - Son développement en surface freine le ruissellement et l'érosion éolienne.
- L'apport en matière organique améliore la structure du sol et sa cohésion.

III.5.1.4. La topographie (La morphologie du terrain)

❖ Influence de l'inclinaison de la pente

Sur les pentes convexes, la perte en terre est plus grande, tandis que les pentes concaves, l'érosion est moins intense (FAO, 1976).

La topographie du terrain intervient également dans les phénomènes d'érosion : Le gradient de pente et la surface d'alimentation contrôlent en partie les flux et la vitesse de ces derniers. La pente intervient par son inclinaison, sa forme et sa longueur.

La pente est un facteur important d'érosion hydrique. Le ruissellement et l'érosion débutent sur des pentes mêmes faibles (1 à 2%) et s'accroissent avec l'inclinaison des terrains. L'augmentation de la pente accentuera les phénomènes de ruissellement et donc d'érosion.

Généralement, l'érosion augmentera avec la longueur de pente, mais la présence d'irrégularités de terrain peut provoquer l'effet inverse. L'érosion sera plus importante sur les pentes convexes que concaves.

Tous les auteurs s'accordent sur le rôle essentiel de l'inclinaison de la pente sur l'érosion, les pertes en terre croissent de façon exponentielle avec l'inclinaison (S%), suivant l'équation de la forme (Roose E, 1977).

$$E = K.S^n$$

E : perte de terre (érosion)

K : coefficient variable

n : varie selon le type d'érosion

S : pente %

❖ **Longueur de la pente**

Plus la pente est longue, plus le ruissellement s'accumule et prend de la vitesse et de l'énergie qui se traduit par une érosion importante.

❖ **La forme de la pente**

Les pentes par leur forme agissent favorablement pour l'installation des processus érosifs. D'après Wischmeier (1976), une pente concave diminue les transports solides par sédimentation locale tandis qu'une pente convexe l'augmente en fonction de l'inclinaison du segment en pente forte.

III.5.2. Facteurs anthropique

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 défrichement des forêts, incendies et surpâturages et pratiques culturales. De plus, 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.

❖ **L'action de l'homme**

L'action de l'homme peut contribuer à déstabiliser la structure des sols, ainsi, le labour favorise la minéralisation des matières organiques, conduisant à sa diminution. Par ailleurs, la suppression par l'homme des haies et talus pour élargir les parcelles agricoles favorise le ruissellement, et en conséquence l'érosion des sols sur ces parcelles. En revanche, la présence de résidus de culture et de la végétation peut contribuer à protéger le sol de l'impact des gouttes de pluie et à ralentir la vitesse de l'eau de ruissellement, ce qui permet une meilleure infiltration de l'eau dans le sol.

Le manque de mesures de prévention dans des interventions telles que :

- Les travaux agricoles (désherbages, labours sur reliefs accidentés...)
- Les terrassements (construction d'infrastructures diverses, stockage de terres réutilisables, aménagements divers, exploitation de mines et carrières.....)
- Les travaux d'entretien non adaptés (brulis, fauchage et/ou désherbage trop intensif.....) est également générateur d'une érosion conséquente des sols.

▪ **L'avancée urbaine**

La priorité accordée à l'urbanisme au détriment de la reforestation

▪ **La prédominance de la céréaliculture sur forte pente**

La quasi-totalité de la SAU est exploitée par la culture céréalière associée à la jachère. L'état de la surface du sol joue un rôle important pour réduire le volume ruisselé ainsi que les pertes en terre.

▪ **Le surpâturage**

Le surpâturage représente une cause d'érosion majeure. Il conduit à un appauvrissement du couvert végétal au détriment de la stabilité des terres la pression exercée par le surplus des animaux domestiques ne donne plus le temps aux plantes herbacées de croître. L'élimination du couvert végétal par le surpâturage, permet l'installation du processus de l'érosion qui conduit à la dégradation des écosystèmes.

▪ **Les facteurs liés aux activités agricoles**

Plusieurs facteurs liés aux activités agricoles peuvent influencer l'érosion hydrique.

Les cultures : Si on garde à l'esprit qu'il est important de maintenir le sol couvert le mieux et le plus longtemps possible, il devient aisé en principe de classer les types de cultures et les rotations culturales en catégories favorables ou défavorables.

Le travail du sol : Plusieurs facteurs peuvent entrer en considération dans le cadre de l'évaluation de l'impact du travail du sol sur l'érosion hydrique des sols :

- Un travail du sol qui affine trop le sol en surface (préparation du semis, etc.) est à proscrire car il favorise la mise en boue lors de précipitations subséquentes. Le sol de surface « pulvérisé » a perdu sa cohésion. Il se sature rapidement : flux boueux, croûtes de battance, imperméabilisation de surface en sont les conséquences ;

- Les sols labourés de manière appropriée (sol ressuyé, époque et modalités adéquates) voient en général leur capacité d'infiltration améliorée.

Cependant le labour peut les rendre plus sensibles à l'érosion, surtout sur les terrains en pente ;

- Certains sols ont une meilleure capacité d'infiltration pour un travail du sol limité, d'autres pas, dans le second cas, restant plus compacts et plus cohésifs en surface, les sols pourront être moins fragiles (érodibilité moindre) mais ils risquent cependant d'être plus fréquemment agressés suite à l'accroissement du ruissellement (érosivité globalement plus élevée) ;

- L'orientation des sillons : en sols bien infiltrants, pour des pluies pas trop excessives et des pentes ni trop fortes ni trop irrégulières, les sillons orientés perpendiculairement à la pente peuvent en principe constituer des microréservoirs d'infiltration (« Sillons d'infiltration »).

D'une manière générale, s'ils sont installés légèrement en oblique par rapport à la courbe de niveau, ils peuvent constituer des micro-chenaux (« sillons chenaux »), les eaux étant à conduire alors vers un chenal ou fossé de récolte approprié. Dans les deux cas, existe cependant le risque d'accentuation du problème érosif lors de précipitations importantes (orages) du fait du débordement des sillons de capacité insuffisante ou profitant de malfaçons locales.

Les machines agricoles : Les traces de roues inhérentes au passage des machines agricoles peuvent favoriser la concentration des rigoles d'eau de ruissellement et accentuer ainsi le problème de l'érosion et des boues.

III.6. Estimation des pertes de terres (Quantification de l'érosion hydrique)

Ces méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion (actuelle et/ou risque) varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles de travail.

La quantification peut se faire par :

- Mesures directes
- Des évaluations indirectes

III.6.1. Les mesures directes

III.6.1.1. Mesures topographiques

Dont le principe se base sur le suivi de l'évolution topographique de la surface du sol, notamment :

- **Mesure par rugosimètre :** on estime la variation de la hauteur du sol par rapport à un plan de référence.
- **Suivi de l'évolution des ravines :** on mesure la variation des dimensions de certaines sections des ravines après chaque évènement pluvieux.

III.6.1.2. Simulation de pluie

Dont 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 :

- 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.

Pour pouvoir effectuer des simulations de pluie sur le terrain, il est nécessaire de passer par l'étape de préparer les parcelles de mesure dont voici une illustration.



Figure 14 : Parcelles aménagées pour simulation de la pluie.

Il y a plusieurs types de simulateurs des plus simples ou plus complexes. Exemple : un simulateur qui est très simple qui peut être même confectionné par l'utilisateur, c'est le modèle minisimulateur type **ORSTOM** et se présente comme suit:

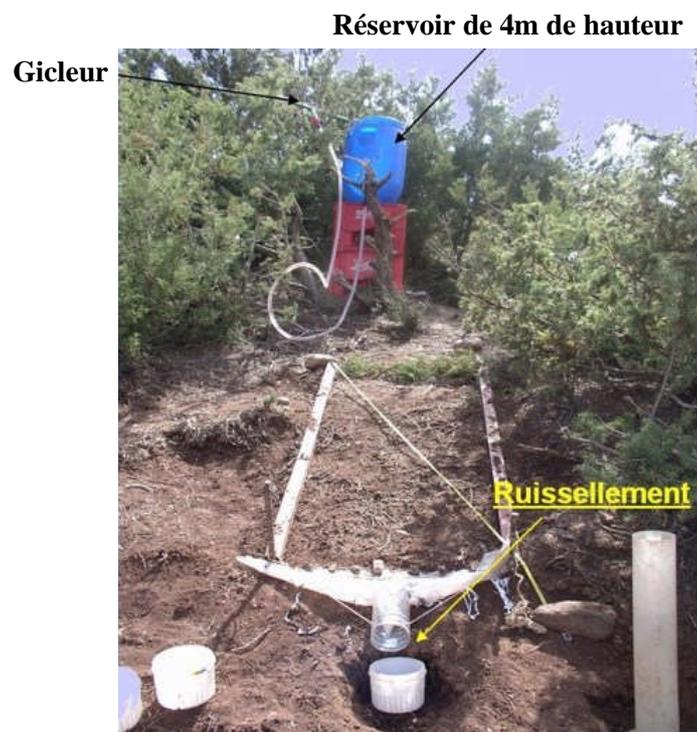


Figure 15 : Parcelle expérimentale (Simulateur de pluie).

III.6.1.3. Mesures par l'étude du transport solide

❖ Transport en solution :

Sa mesure est relativement facile puisque les concentrations en matières dissoutes sont en général homogènes dans une section. Ces concentrations sont liées à

la conductivité qui est facilement mesurable in situ. Une formule établie par Richard et N'Guyen montre cette relation comme suit : $C(\text{mg/l}) = K/R$ (ohms/cm.cm²)

R < 100	K = 767090
100 < R < 1200	K = 684207
1200 < R < 3000	K = 645760
3000 < R < 6000	K = 694156
6000 < R < 20000	K = 854788
R > 20000	K = 1231301

❖ **Transport en suspension :**

Son évaluation peut être faite in situ ou au laboratoire. En générale, le nombre de mesures est petit. En fait, on peut faire :

- Soit une seule mesure verticale au milieu ou au point le plus profond de la section ;
- Soit quelques mesures (2 à 5) réparties sur la section. Ainsi, Colby a établi un abaque pour la détermination du nombre de verticales à réaliser en tenant compte de la granulométrie des sédiments et d'un coefficient hydraulique :

$$K = \frac{\left[\frac{V^2}{D} \right]_{\max}}{\left[\frac{V^2}{D} \right]_{\text{moy}}}$$

Avec :

V : est la vitesse moyenne sur une verticale.

D : est la profondeur de cette verticale.

Généralement, on estime que 80 à 90 % du transport des solides se font au cours des périodes de crue durant lesquelles les conditions du travail sont les plus défavorables (manque de données).

❖ **Transport de fond :**

Peut être estimé selon plusieurs méthodes à savoir des pièges à sédiments installés au fond de la zone active du lit, des fosses creusées au fond du lit ou aussi par marquage isotopique des sédiments. Cependant, sa mesure est imprécise.

III.6.1.4. 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.

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.

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. La détermination de la profondeur des sédiments par rapport à la surface d'eau est appelée bathymétrie.

III.6.2. Les mesures indirectes

III.6.2.1. La modélisation

Il ressort que les phénomènes d'érosion sont le résultat d'interactions complexes variables dans le temps et l'espace. Dans une optique d'évaluation des risques ou d'établissement de schémas d'aménagement pour la conservation des sols, le recours à la modélisation peut constituer un outil d'aide à la décision.

Cependant, on peut rappeler que la modélisation a pour objectifs d'une part, de tester notre compréhension des processus intervenant dans la dégradation des sols par l'érosion et d'autre part, prévoir les risques futurs sous des conditions variables.

III.6.2.2. La télédétection et le système d'information géographique

De nos jours, les techniques de cartographie numérique, depuis les traitements d'images satellitaires jusqu'aux systèmes d'information géographique (SIG) en se fondant sur l'équation universelle de pertes en sols de Wischmeier sont de plus en plus utilisées. Elles permettent d'une part, de quantifier les pertes annuelles en sols et d'autre part, d'identifier et de cartographier les surfaces des sols nécessitant la plus grande priorité d'intervention pour la protection du patrimoine sol afin de réduire les apports solides au niveau des retenues du barrage.

III.6.2.2.1. L'utilisation de l'imagerie satellitaire

L'intérêt grandissant des études à échelle pluri-kilométrique et les problématiques environnementales associées ont stimulé l'utilisation de la télédétection dans les études des ressources naturelles et de l'environnement.

Sur la base de la connaissance des états de surface et de leur comportement vis-à-vis des ruissellements et de l'érosion par expérimentation, la cartographie des risques érosifs est possible à grande échelle (parcelle, petit bassin versant élémentaire) mais aussi sur des surfaces qui peuvent atteindre plusieurs milliers de km² grâce à des modèles spatiaux.

L'acquisition de données satellitaires (Landsat TM ou SPOT), une technique et un outil couramment utilisés aujourd'hui, peut servir à la cartographie des risques érosifs. Si cette approche ne peut en aucun cas remplacer les études de terrain pour établir une compréhension du phénomène, de par son caractère spatial et temporel, elle reste la méthode de régionalisation et de mise à jour la plus rapide et la moins coûteuse. Actuellement, on peut atteindre une précision cartographique compatible avec des échelles de l'ordre du 1/25000ème et de 1/50 000ème.

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.

III.6.2.2.2. L'intérêt du système d'information géographique (SIG)

Un Système d'information géographique (SIG) est, comme son nom l'indique, un outil informatisé dédié à la gestion de l'information géographique. Ce type de système permet d'apporter à chacun l'information dont il a besoin pour décider et agir au mieux. C'est un outil de représentation d'une réalité, de compréhension des phénomènes et des conditions dans lesquelles ils se réalisent, de simulation d'alternatives et de leurs effets.

C'est aussi un outil de dialogue et de communication entre disciplines par un constant aller-retour entre observation, interprétation, hypothèse et validation. L'utilisation de ce genre de système offre un moyen simple, rapide et efficace à l'utilisateur, pour les études d'aménagement et de prise de décision.

La lutte contre l'érosion hydrique en particulier et la complexité de ce phénomène imposent aujourd'hui l'utilisation de méthodes et de moyens performants pour la gestion de l'information géographique. C'est ainsi que la cartographie de l'ampleur spatiale du phénomène de l'érosion est fournie en utilisant le SIG.

III.6.2.3. Utilisation des radioisotopes : le césium-137

^{137}Cs est un radioélément qui est apporté à la surface terrestre par déposition atmosphérique. 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. Ensuite, à l'aide de différents modèles, la perte en sol peut être estimée sur la base des pertes en radioéléments. 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 . Vu son intérêt et sa précision, cette méthode est de plus en plus utilisée. Par ailleurs, il est à signaler que c'est une méthode qui est très coûteuse.

III.7. Méthodes de prévention et de lutte

III.7.1. Les méthodes physiques

III.7.1.1. Les cordons en pierres

Les cordons pierreux sont des obstacles filtrants qui ralentissent la vitesse de ruissellement ; 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 (Hien, 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).



Figure 16 : Les cordons en pierres (HCEFLD, 2014).

III.7.1.2. Les murettes

La construction d'une murette en pierre sèches suivant les courbes de niveau ; 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 entraînés 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).



Figure 17 : Murette en pierre sèche (HCEFLD, 2014).

III.7.1.3. Les terrasses

Le but des terrasses est de diminuer la longueur de la pente de l'écoulement en construisant un fossé intercepteur 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 18 : Les terrasses (HCEFLD, 2014).

III.7.1.4. Les gabions

Les gabions sont constitués par des paniers faits de fils galvanisés, remplis de pierres et montés les uns sur les autres. Ce type d'ouvrage est habituellement plus coûteux à construire qu'un perré et, pour cette raison, on s'en sert surtout lorsque l'espace disponible ne permet pas l'installation d'un perré (MENV, 1999).

La construction d'un mur en gabions obéit généralement aux mêmes règles que celle d'un perré notamment pour l'aménagement d'une clé ou butée à la base de l'ouvrage et l'installation d'une membrane géotextile entre le sol et les gabions. Les pierres remplissant 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. 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. (MENV, 1999)



Figure 19 : Les seuils en gabion utilisées dans la fixation des ravines (Melalih, 2012).

III.7.1.5. Les seuils en pierres sèches

La construction des seuils en pierres traversant le ravin en largeur. 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.



Figure 20 : Les seuils en pierres sèches (Melalih, 2012).

III.7.1.6. Seuils en pierres cimentées

Construction des seuils en pierres cimentées disposé perpendiculairement à l'axe de l'entaille. 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%.



Figure 21 : Seuils en pierres cimentées (HCEFLD, 2014).

III.7.1.7. Banquettes

La banquette est un ouvrage de forme rectangulaire construit en terre compactée, en pierres ou avec un mélange des deux. 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 22 : Banquette A (HCEFLD, 2014)

III.7.2. Les méthodes biologiques et les pratiques culturales

III.7.2.1. Le reboisement et reforestation

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

III.7.2.2. Le paillage (mulching)

Il consiste à recouvrir les interlignes d'une couche de 10 à 20 cm de matière végétale mortes (paillis ou mulch) provenant :

- De la culture principale.
- D'autres cultures (débris végétaux).
- D'herbes de savane.

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 G et Roy A.L, 1999).

Le paillage 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.



Figure 23 : Le paillage (Biji A, 2012).

III.7.2.3. 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 E, 1994).

Les billons sont mis en place en fin de saison sèche, quelques jours avant les plantations. Les billons peuvent être disposés :

- 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. 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.

III.7.2.4. 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 A, 2012) :

- Les apports humifères ;
- L'action des différents systèmes racinaires sur la structure du sol ;
- Le travail du sol.

III.7.2.5. 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 A, 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 A, 2012).

III.7.2.6. 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 A, 2012).

IV. Les procédés de contrôle du ruissellement

IV.1. Introduction

Modelé du terrain et techniques biologiques ne permettent pas de résoudre tous les problèmes de conservation des eaux et des sols. Dès que la pluviométrie devient insuffisante pour permettre la mise en place d'une couverture végétale, dès que la pente devient importante, il est indispensable d'envisager de nouvelles techniques nécessitant des terrassements. Ces techniques permettent un contrôle du ruissellement.

IV.2. Types de procédés de contrôle du ruissellement

On distingue habituellement trois (3) catégories pour le contrôle du ruissellement :

❖ Les systèmes de concentration du ruissellement.

Ils s'emploient lorsque la pluviométrie est médiocre. La pluviométrie seuil est grossièrement de 400 à 500 mm. Sous ces climats, les cultures pluviales ne peuvent être assurées chaque année.

Ce sont des ouvrages horizontaux construits selon les courbes de niveau pour recueillir le ruissellement issu d'un glacis sus-jacent. Seule la fraction de la surface recueillant le ruissellement est cultivée. Le bilan hydrique de la fraction cultivée est amélioré par l'infiltration du ruissellement issu du glacis amont.

❖ Les systèmes d'absorption ou d'infiltration

Ils s'emploient lorsque la pluviométrie permet une culture sèche avec des rendements suffisants (pluviométrie inférieure à 750 ou 800 mm). Il s'agit d'ouvrages horizontaux (construits selon les courbes de niveau) conçus pour provoquer l'infiltration totale des précipitations reçues par la partie d'un versant comprise entre 2 courbes de niveau. Ils ne conviennent que sur des sols perméables, à pentes faibles. La totalité de la surface comprise entre 2 ouvrages est cultivée et peut bénéficier de techniques de conservation des eaux et des sols complémentaires (Cultures en courbes de niveau, bandes enherbées ...). La partie immédiatement à l'amont de l'ouvrage bénéficie de l'apport complémentaire lié à l'infiltration du ruissellement.

❖ Les systèmes de diversion

Ils conviennent lorsque les précipitations sont abondantes. Ce sont des ensembles d'ouvrages à très faible pente longitudinale (inférieure à 0.3 %). Chaque ouvrage a pour rôle de briser la force vive du ruissellement déversant, d'infiltrer une partie de l'eau ainsi retenue momentanément et d'évacuer le reste vers un exutoire convenablement aménagé. L'évacuation de l'excès d'eau en saison des pluies évite les problèmes de lessivage exagéré des sols.

IV.2. Les ouvrages courants

IV.2.1. Les terrasses (bench terraces)

Il s'agit de plates-formes de terre disposées en marche d'escalier. Les terres de remblai sont soutenues à l'aval, soit par un mur, soit par une pente gazonnée.

Elles permettent la culture sur de fortes pentes mais nécessitent d'importants travaux difficilement mécanisables. Leur utilisation est de moins en moins fréquente. Elles sont remplacées aujourd'hui par la technique des terrasses progressives ou rideaux.

IV.2.2. Les rideaux ou terrasses progressives

Les rideaux résultent d'un modelé des champs, obtenu moins par terrassement que par une évolution progressive due au labour ou au départ naturel des terres vers l'aval. Ils se forment chaque fois que 2 champs, l'un amont, l'autre aval, sont séparés par une limite perpendiculaire à la pente (ligne de non labour, bande d'arrêt enherbée, muret ...). A force de labourer en versant vers le bas ou suite au glissement des terres, le bord amont de cette limite se relève alors que le bord aval se creuse. Le profil général du terrain offre alors une succession de champs moins pentus, séparés par une série de décrochements ou rideaux.

IV.2.3. Les banquettes

Ce sont des ouvrages servant à couper les parcelles selon les courbes de niveau par des obstacles horizontaux (fossés, talus). Elles brisent l'énergie du ruissellement, augmentent l'infiltration et évacuent les eaux vers des exutoires.

IV.2.4. Les diguettes

Il s'agit d'une technique développée dans les secteurs à pente faible (quelques pourcents). Soumis à l'érosion en nappe.

IV.2.5. Les techniques de concentration du ruissellement

Ces procédés utilisent les principes suivants :

- ✓ Une fraction de la parcelle n'est pas cultivée. Elle constitue un petit bassin versant permettant le développement d'un ruissellement.
- ✓ Le reste de la parcelle est consacrée aux cultures. Le ruissellement s'y concentre et s'y infiltre.

Ces techniques sont particulièrement adaptées aux sols limoneux, de mauvaise stabilité structurale et à forte capacité de rétention en eau.

Il s'agit essentiellement des sols péri-désertiques et dans une moindre mesure, des sols bruns ou des sols ferrugineux. Le ratio surface du glaciaire/surface cultivée dépend de la pluviométrie locale. Un bilan hydrique au niveau de la fraction cultivée permet le dimensionnement du dispositif.

V. Dimensionnement des dispositifs de contrôle de ruissellement

L'efficacité des ouvrages est liée à leur densité (écartement entre deux ouvrages successifs) Pour l'installation des ouvrages anti-érosifs, deux approches coexistent : L'approche empirique et le dimensionnement suivant le bilan hydrique.

VI. La lutte contre l'érosion en Ravine

L'érosion en ravine est importante par les volumes de terre mis en jeu, et par les risques qu'elle fait courir à la stabilité des ouvrages situés en amont. De plus, les ravines servent fréquemment d'exutoires aux eaux évacuées par un réseau de diversion. Leur correction s'intègre donc normalement dans le problème de l'écoulement des eaux.

VI.1. Débits de ruissellement

En l'absence de données hydrologiques précises, les débits de dimensionnement doivent être approchés par des formules empiriques. Il s'agit du cas le plus général, puisque les bassins versants considérés sont fréquemment de tailles très modestes.

Les formules principalement utilisées en Afrique francophone sont :

La méthode Rodier-Auvray, pour l'estimation des débits de crue décennales pour des bassins versants de superficie inférieure à 200 km² (Rodier et Auvray, 1965).

La formule rationnelle.

$$Q = a.i.A$$

Avec **Q** : le débit de pointe. **a** : un coefficient d'abattement. **I** : l'intensité de la pluie pour un temps de récurrence choisi et pour une durée égale au temps de concentration du bassin. **A** : la surface du bassin (bassin inférieur à 1300 ha).

VI.2. Types de voies d'eau ou d'évacuation

a) Fossés de diversion ou protection ou de gardes

Les fossés de diversion sont creusés en travers du versant pour protéger les terres cultivées d'aval faisant l'objet d'un aménagement de CES et détourner les eaux de l'amont vers un exutoire choisi.

b) Talwegs ou voies d'eau ("waterways") et chutes

En principe, ce sont des voies naturelles reprises et aménagées. Elles permettent d'éliminer les eaux excédantes issues des fossés de diversion des aménagements antiérosifs (banquettes, diguettes, ...). Situées dans des zones cultivées à faible pente, elles sont traitées selon les méthodes américaines, c'est à dire :

- Avec des pentes transversales très faibles (4/1 à 6/1) afin que l'élargissement du lit réduise l'épaisseur et la vitesse d'écoulement à des valeurs compatibles avec la protection herbacée.
- En conservant ou en créant une pelouse. Lorsque les voies deviennent importantes, on peut y laisser la végétation broussailleuse naturelle, mais on s'interdit alors d'y faire passer des instruments de culture.

La confection et la consolidation du chenal doivent, sauf cas exceptionnels en sols très résistants, intervenir avant l'ouverture des ouvrages du réseau tributaire et des fossés de garde amont.

Les ouvrages de consolidation provisoire servant à remettre en état des talwegs déjà ravinés, tels que fascinés, rondins, gabions et murettes en pierre sèche, doivent

être obligatoirement remplacés dans le temps par la végétation fixatrice définitive, avec ou sans structures permanentes.

En Afrique, les difficultés techniques et surtout sociales en liaison avec l'élevage en vaine pâture, n'ont pas permis une généralisation aussi poussée de l'aménagement d'exutoire enherbé. Souvent, malgré des réseaux de fossés et banquettes bien exécutés, la fin de l'aménagement, à base de pierres sèches laisse à désirer et est la cause d'une érosion ravinante encore sensible.

c) Correction de ravines (marigots, koris, ...).

Les principaux objectifs du traitement des ravines sont les suivants :

- Freiner la vitesse de l'eau pour stopper l'érosion régressive, à l'origine de la formation de la ravine et de son évolution.
- Provoquer une sédimentation à l'amont de l'ouvrage, afin de réduire la pente de la ravine.
- Lorsque cela est possible, permettre l'épandage des eaux, afin de favoriser la mise en place d'une agriculture performante.

Bien que variés, les traitements de ravines utilisent des principes voisins. Il est toujours souhaitable de respecter au mieux ces principes, tout en s'adaptant aux configurations du terrain.

VI.3. Traiter la ravine de l'aval vers l'amont

L'érosion par ruissellement est régressive. L'aménagement d'une ravine doit commencer à partir d'un secteur stabilisé (absence d'érosion due à une diminution de pente ou à la présence d'un seuil rocheux : affleurement de cuirasse, par exemple). Les dispositifs sont ensuite réalisés en remontant vers l'amont. Le non-respect de ce principe peut entraîner un sapement de l'ouvrage situé le plus à l'aval, puis progressivement de tous les ouvrages.

La stabilité des ouvrages est accrue en réalisant des aménagements en escalier : la fondation d'un ouvrage est à une cote inférieure à la cote de déversement de l'ouvrage situé immédiatement à l'aval.

VI.4. Traiter le bassin versant amont

Afin de diminuer les ruissellements dans le bas fond ou la ravine, il est nécessaire de traiter les versants par les techniques habituelles de CES (Diguettes,

bandes enherbées, ...). L'effet sur les crues de fréquences élevées sera net et réduira considérablement l'entretien courant des ouvrages.

L'effet sur les crues de fréquences faibles (décennales, centennales) sera limité et ne pourra empêcher la destruction éventuelle de l'ouvrage.

VI.5. Traiter de petits bassins versants

Dans l'aménagement d'un grand bassin versant, les dispositifs doivent être réalisés par sous-bassins successifs, de taille croissante.

❖ Epandre l'eau sur des surfaces importantes

Chaque fois que possible, les ouvrages de correction devront épandre les eaux sur des surfaces importantes. L'intérêt est triple :

- Réduire les lames d'eau ruisselantes, et donc les vitesses d'écoulement,
- Réduire la lame d'eau déversante sur l'ouvrage et donc le risque d'érosion au pied de l'aménagement,
- Faciliter l'infiltration à l'amont de l'ouvrage. Associé à une importante sédimentation, cet épandage de la crue favorise le développement d'une agriculture performante où l'alimentation hydrique des cultures et la fertilité des sols est améliorée. La possibilité d'une production agricole motive les agriculteurs locaux à entretenir les ouvrages.

VII. Érosion éolienne

VII.1. Définition

L'érosion éolienne se manifeste dans les climats arides là où les pluies sont < à 600 mm sur des sols dénudés et en présence des vents avec des vitesses dépassant un seuil de l'ordre de 20 km/h ou de 6 m/s sur sols secs. Elle peut avoir lieu également dans des climats humides lorsque certains mois de l'année sont particulièrement secs, en plus que le sol soit préparé par des techniques culturales qui pulvérisent la surface du sol.

VII.2. Origines et mécanismes de l'érosion éolienne

VII.2.1. Facteurs de l'érosion éolienne

Le facteur déterminant dans la manifestation de l'érosion éolienne est particulièrement l'intensité érosive de la force du vent, qui agit sur la surface du sol.

La texture, la structure, la nature du sol et la matière organique : interviennent comme facteurs de risque de l'érosion éolienne. Les sols les plus fragiles et les plus sensibles à l'effet de l'érosion éolienne sont les sols sableux. Cependant, certaines particules de faible diamètre peuvent résister à l'action érosive du vent et ce, grâce à leur aptitude à la cohésion.

La structure du sol est l'arrangement des particules individuelles du sol en agrégats. Les agrégats sont plus lourds que les particules individuelles à être transportées par le vent.

Les processus d'agrégation dépendent étroitement des conditions climatiques et des phénomènes mécaniques qui interviennent en surface. La structure se modifie constamment et tout ce qui tend à réduire le degré d'agrégation aggrave par la suite les risques d'érosion. Moins les sols comportent en surface de matières qui améliorent la structure (matières organiques, fer et alumine libre, calcaire), et plus ces sols sont fragiles.

La Topographie : agit dépendamment de L'augmentation de la rugosité du terrain par la présence de billons ou des bandes de labour intervient à réduire l'effet de l'érosion éolienne et ce, en agissant comme un obstacle de réduction de la vitesse du vent (donc selon l'orientation par rapport au vent dominant). Aussi, la pierrosité à la surface du sol, en formant un "pavage", réduit les risques d'érosion éolienne. C'est le cas dans les regs.

Le Couvert végétal : La couverture végétale protégée contre l'érosion éolienne par son action à réduire la vitesse du vent à la surface du sol. La plupart des sols ont besoin une couverture végétale d'au moins de 30% pour prévenir l'action destructrice de l'érosion éolienne. Aussi, à signaler que les chaumes et les résidus de culture étalés sur le sol pourraient représenter une alternative à adopter pour réduire la vitesse du vent au ras du sol. L'humidité du sol augmente la cohésion des particules du sol, rendant ceux-ci temporairement indisponibles pour l'arrachage

VII.2.2. Les mécanismes de l'érosion éolienne

Du point de vue mécanique, le vent a plusieurs modes d'action suivant l'échelle considéré. Il existe trois modes différents d'entraînement des particules : **la saltation**, **la reptation** en surface et **la suspension**.

VII.2.2.1. La saltation

Le mouvement initial des particules du sol est une série de sauts. 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. La partie descendante de la trajectoire est très inclinée vers le sol et pratiquement rectiligne. 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. Le phénomène de saltation est indispensable pour amorcer 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.

VII.2.2.2. La reptation en surface

Les particules de plus grande dimension roulent ou glissent à la surface du sol. 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.

VII.2.2.3. La suspension

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. 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.

VII.3. Effets de l'érosion éolienne

VII.3.1. 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 :

❖ **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

VII.4. Estimation de l'érosion éolienne et méthode de prévention

VII.4.1. Estimation de l'érosion éolienne

VII.4.1.1. Mesures directes

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

❖ **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. 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. Cette quantification est calculée sur la base du bilan des fluctuations du niveau du sol à partir d'un état initial pris comme origine.

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

❖ 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. Ce sont des collecteurs qui peuvent être disposés à différentes hauteurs au-dessus du sol.

VII.4.1.2. 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

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

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

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.

VII.4.2. Méthode de lutte contre l'érosion éolienne

VII.4.2.1. 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

❖ **La fixation mécanique des dunes (les palissades)**

La technique des palissades 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.

❖ **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 :

- 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.

❖ **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 :

- 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).

- Aspersions 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).

Références bibliographiques :

Baptiste A., Frédéric D., 2013. INRA, UR 0272 USS (Unité Science du Sol). Centre de recherche d'Orléans, France.

Barro S.E., 1995. Notes de cours sur la conservation des eaux et des sols. EIER. 48pp.

Belgharbi B., Sadat H., 1994. Contribution à l'étude et la cartographie de l'érosion dans les monts de Béni-Chougrane : facteur anthropique. Thèse d'ingénieur en foresterie. Université de Tlemcen. Pp 26,52-73.

Bielders C., 2004. Les mécanismes de l'érosion hydrique, Antoing 16 décembre 2004 - Unité de Génie Rural, UCL.

Biji A., 2012. Guide de Référence sur les Pratiques de Prévention de Lutte contre l'érosion dans le département du Sud d'Haïti.

Darboux F., 2009. L'érosion, un acteur majeur de la dégradation des sols et de l'environnement dans « Le Sol » - Dossier INRA – p.128-131.

Darboux F., 2009. L'érosion, un acteur majeur de la dégradation des sols et de l'environnement dans « Le Sol » - Dossier INRA – p.128-131.

Dautrebande S., Cordonnier H., Thirion M., Bielders C., 2006. Lutter contre l'érosion des terres. Les livrets de l'agriculture, p12, 41.

FAO., 1976. La conservation des sols dans les pays en voie de développement. Bulletin pédologique, vol. 30, 92p.

FAO., 1983. Garder la terre en vie : L'érosion des sols, ses causes et ses remèdes. Bulletin pédologique, vol. 50, 62p.

FAO., 1988. Cahiers FAO Conservation n° 18 ; manuel de fixation des dunes.

FAO., 2014. Word Reference Base for Soil Resources. Food and Agriculture.

FAO., 2019. Global symposium on soil erosion (GSER 19) - 15–17 MAY 2019|FAO - headquarters, Rome, Italy.

Girard M.C., Walter C., Rémy J.C., Berthelin J., Morel, J.L., 2005. Sols et environnement. Paris, DUNOD, 816 p.

GIZ., 2012. Bonnes pratiques de conservation des eaux et des sols.

HCEFLCD., 2014. Haut-Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte. Contre la Désertification. Maroc.

Heusch B., 1982. Etude de l'érosion et des transports solides en zone semi-aride. Recherche bibliographique sur l'Afrique du nord. Projet RAB/80/04 PNUD.p83.

Hien F.G., 1995. La régénération de l'espace sylvopastoral au Sahel : Une étude de l'effet de mesures de conservation des eaux et des sols au Burkina Faso. Document sur la gestion des ressources tropicales⁷. Université Agronomique Wageningen, 219p.

Ignacio M.D., Stanley P., et Sonel A., 2014. Cartographie de l'Occupation, de la Dégradation et de la Conservation des Sols dans les Communes de Gonaïves, Ennery et Saint Michel du Département de l'Artibonite. FAO-HAITI Document de Terrain 2/2014.

Jérôme P.E., 2010 : RHB 2 Erosion - Conservation des sols.

Lagacé R., 1980. "Erosion et conservation des sols", Compte-rendu des conférences, 8e colloque de génie rural, Ed., Université Laval 135 p.

Lagacé R., 2015. Irrigation souterraine, chapitre 9 du cours de Drainage GAE-3001.

Leguëdois S., 2003. Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Modélisation du transfert et de l'évolution granulométrique des fragments de terre érodés, Phd thesis, Université d'Orléans.

Mainguet M., Dumay F., 2006. Combattre l'érosion éolienne : Un volet de la lutte contre la désertification. Les dossiers thématiques du CSFD. N°3. Montpellier : Agropolis. 44p.

Melalih A., 2012. Analyse des techniques de conservation de l'eau et du sol dans la zone aride cas bassin versant d'AIN SEFRA, Mémoire de Magister - Université de Tlemcen, Faculté des SNV – 144p.

Ministère de l'Environnement (MENV), 1999. Fiche technique N° 1 : Stabilisation naturelle des rives. Publications du Québec, Québec, 9 p.

Rampon A., 1987. Sédimentation et barrage : Erosion et transport : Les dépôts dans les barrages. CEMAGREF, Groupement d'Antony. Division de mécanique des sols et génie civil. Mémoire N° 18. Paris. France.

Regis G., Roy A.L., 1999. MARNDR - Coopération française, Manuel pratique de conservation des sols d'Haïti, 132 p.

Rodier J.A., Auvray C., 1965. Estimation des débits de crue décennale pour les petits bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale. Publication CIEH, Orstom, Paris. 46 p.

Roose E., 1977. Erosion et ruissellement en Afrique de l'Ouest, Travaux et documents de l'ORSTOM n°78, ORSTOM, Paris.

Roose E., 1994. Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols. FAO, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. Bulletin pédologique 70. 502 pp. ISBN 92-5-203451-X.

Ruelle P., Séné M., Juncker E., Diatta M., Perez P., 1990. Défense et restauration des sols. Dakar: ISRA, 50 p.

Wischmeier W.H., 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. Journal of soil and water conservation 31, pp 5-9.