

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département des Sciences Agronomiques

Polycopié de Cours **Conservation des Sols**

Unité d'Enseignement Fondamentale

**Polycopié destiné aux étudiant(e)s en
formation académique licence Sol et Eau**

Proposé par Dr. CHERFOUH R.



Année universitaire 2024-2025

AVANT PROPOS

Le sol est une ressource naturelle essentielle qui assure de multiples fonctions écologiques, agricoles et hydrologiques. Cependant, il est soumis à des processus de dégradation qui compromettent sa fertilité et ses services écosystémiques. Parmi ces processus, l'érosion hydrique et l'érosion éolienne représentent les principaux facteurs de dégradation des sols, particulièrement dans les régions soumises à des régimes de précipitations intenses, de sécheresses et à des pratiques culturales inadaptées. Le phénomène d'érosion entraîne l'appauvrissement des sols en éléments nutritifs, la diminution de leur capacité de rétention en eau, ainsi que l'envasement des cours d'eau et des barrages, affectant ainsi directement les ressources en eau et la biodiversité des milieux aquatiques et terrestres. L'ampleur du phénomène d'érosion des sols menace directement la sécurité alimentaire, la qualité des ressources en eau et la biodiversité des écosystèmes.

*Face à ces enjeux, l'étude **des mécanismes d'érosion** et des **stratégies de conservation des sols** revêt une importance capitale. Une compréhension fine des processus physiques et chimiques impliqués permet d'élaborer des approches de gestion durable adaptées aux spécificités des territoires. De plus, la conservation des sols contribue non seulement à la préservation de la productivité agricole, mais aussi à la protection des écosystèmes en régulant le cycle de l'eau et en favorisant le maintien de la biodiversité.*

*Ce polycopié vise à fournir aux étudiants, du niveau licence en sciences agronomiques, une base théorique et méthodologique solide sur les dynamiques de l'érosion, les **indicateurs de dégradation** des sols et les techniques de lutte en vue d'une gestion durable du milieu. Il aborde la conservation des sols en relation avec la connaissance des principes fondamentaux de la pédologie, de l'hydrologie et de l'agronomie appliquée, tout en mettant en avant des études de cas et des outils d'évaluation de l'érosion hydrique et éolienne permettant de caractériser ce processus, via des équations mathématiques (wind erosion prediction equation, universal soil loss equation) d'analyser les facteurs responsables et de proposer des stratégies et des moyens de protection adaptés aux contextes environnants.*

L'objectif est ainsi de former des professionnels capables d'intégrer la conservation des sols dans une approche globale de gestion des ressources naturelles, en tenant compte des impératifs environnementaux, socio-économiques et climatiques.

SOMMAIRE

Liste des figures	i
Liste des tableaux	ii
Introduction générale	1

Chapitre 1. EROSION HYDRIQUE

I. Origine Et Mécanismes	2
I. 1. Le détachement.....	2
I.1.1. L'humectation par l'effet de l'impact de gouttes de pluies.....	2
I.1.2. Le ruissellement	3
I. 2. Le transport des particules du sol.....	5
I. 3. La sédimentation	6

Chapitre 2. FORMES DE L'EROSION HYDRIQUE

II.1. L'érosion en nappe, aréolaire ou laminaire "sheet erosion"	19
II.2. L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill Erosion).....	21
II.3. L'érosion en masse.....	26
II.4. L'érosion des berges	28

Chapitre 3. MOYENS ET TECHNIQUES DE QUANTIFICATION

III.1. Méthodes directes: méthodes de terrain.....	21
III.1.1. Mesures topographiques	21
III.1.2. Simulation de pluies	22
III.1.3. Mesures du transport solide	24
III.2. Mesures indirectes	26
III.2.1. Modèles empiriques (exemple, les équations USLE et RUSLE)	26
III.2.2. Télédétection et imagerie satellitaire	26
III.2.3. Modélisation mathématique.....	26
III.2.4. Modèles physiques déterministes.....	28
III.2.5. Télédétection et le système d'information géographique.....	29

Chapitre 4. APPLICATION DE L'EQUATION USLE

IV.1. Introduction	31
IV.2. Equation USLE.....	31

Chapitre 5. MOYENS ET METHODES DE PROTECTION DES SOLS

V.1. Introduction	38
V.3. Les mesures agronomiques	39
V.3.1. Diminuer l'impact des gouttes de pluie (Objectif 1)	39
V.3.2. Augmenter la capacité d'infiltration (objectif 2).....	41
V.3.3. Réduire la capacité d'incision et de transport (objectif 3)	43
V.4. Mesures Hydrauliques (Curatives)	44
V.4.1. Limiter la concentration du ruissellement (Objectif 1).....	44
V.4.2. Organiser l'écoulement des eaux (objectif 2)	46
IV.2.1. Les bandes enherbées (moyen 1).....	47

Chapitre 6. ÉROSION ÉOLIENNE

6.1. Introduction.....	48
6.2. Contexte méditerranéen	48
6.3. Mécanismes et Facteurs de l'Érosion Éolienne	49
6.3.1. Processus physiques du transport éolien	49
6.4. Facteurs favorisant l'érosion éolienne	50
6.5. Impacts de l'Érosion Éolienne	52
6.6. Évaluation de l'érosion éolienne	54
7. La lutte contre l'érosion éolienne	56
7.1. Cohésion	56
7.2. Rugosité de surface.....	56
7.3. Couvert végétal	56

Chapitre 8. CONSERVATION DES SOLS DANS LE CONTEXTE MEDITERRANEEN

8.1. Introduction.....	59
8.2. Formes de menaces.....	59
8.3. Contexte méditerranéen	59
8.4. Causes majeures de la dégradation	60
8.5. Dispositions institutionnelles.....	63

Références Bibliographiques	644
--	------------

Liste des figures

Figure 1. Etapes caractéristiques de l'érosion : détachement, transport et sédimentation	2
Figure 2. L'état de surface passe par trois étapes	3
Figure 3. Écoulement de surface (a) Ecoulement hypodermique (b).....	5
Figure 4. Modes de transport par ruissellement en fonction du milieu.....	5
Figure 5. Photos Illustratives de l'érosion en nappe en plein paysage.	20
Figure 6. Diagramme de Hjulström.....	21
Figure7. Divers tracés des rigoles sur le terrain.	23
Figure 8. Principales formes d'érosion linéaire (a) Griffes, (b) Rigoles, (c) Ravines.	23
Figure 9. Ravinement sur sols rouges dans la région de Tlemcen (Algérie) (Rosse et al., 2012).	24
Figure 10. Processus de ravinement en U, sur une parcelle de grandes cultures de faible pente. Jaune : partie de sol emportée par le ruissellement. Ap : Hz A labouré.	25
Figure 11. Ravine en tunnel, sur sol lourd à argiles gonflantes de type vertisols.	26
Figure 12. Différentes formes d'érosion de masse.....	26
Figure 13. Décollement de la couverture pédologique sur pente assez forte.	27
Figure 14. Coulées boueuses et laves torrentielles.....	27
Figure 15. Exemple de mouvements de masse menaçant les voies de circulation	28
Figure 16. Erosion hydrographique dans le lit d'une rivière	29
Figure 17. Badlands formées sur des argiles rouges, ultime stade de l'érosion des sols	29
Figure 18. Dispositif de mesure de la rugosité.....	21
Figure 19. Parcelles expérimentales pour l'étude des effets érosifs via les pluies simulées.....	23
Figure 20. Dispositif du modèle de l'irrigateur manuel à rampe.....	23
Figure 21. Vue du simulateur installé à l'INRA d'Orléans.....	24
Figure 22. Représentation des rôles des différentes zones hydrauliques	39
Figure 23. Rôle de la couverture dans la réduction de la quantité et de la charge des eaux de ruissellement (modifié d'après une étude INRA).	40
Figure 24. Croquet d'un pli.	44
Figure 25. Diguette en paille en travers de talweg.....	45
Figure 26. Exemple d'organisation et de fonctionnement des unités hydrauliques.....	46
Figure 27 : image par satellite d'un vent de sable dans le Sahara.....	48
Figure 28: les Trois mécanismes principaux de l'érosion éolienne	49
Figure 29. Tracés induits par les vents dans un paysage dunaire.....	50
Figure 30. Influence d'un brise-vent sur le vent (d'après Combeau, 1977).....	57
Figure 31. Illustrations de palissades érigées pour freiner le mouvement du sable et amendements organiques des sols.....	58

Liste des tableaux

Tableau 1. Les formes d'incision dues à l'érosion linéaire.....	24
Tableau 2. Quelques ordres de grandeurs de pertes de sol par type d'érosion.	29
Tableau 3. Relation entre la concentration K et la résistivité R des eaux de ruissèlement.	25
Tableau 4. classification de l'agressivité des pluies.....	32
Tableau 5. Relevé des précipitations moyennes annuelles par station météorologique.....	32
Tableau 6. Valeur de K en fonction de la texture et de la teneur en matière organique du sol.....	33
Tableau 7. Variation de K en fonction de la texture du sol sur le bassin versant de Oued Rhiou (d'après Kaci et al., 2017)	34
Tableau 8. Valeurs du facteur C.....	35
Tableau 9. Valeurs du facteur C en fonction du type de l'occupation du sol	35
Tableau 10. Valeurs du facteur P	36
Tableau 11. Valeurs Seuils de pertes	36
Tableau 12. Exemple de pratiques à promouvoir pour une réduction des pertes de sols.....	37
Tableau 13. Effet du paillage sur le ruissellement et les pertes en terre (D'après Mannering, 1960 in Derancourt, 1995)	40
Tableau 14. Seuil de vitesse critique des vents en fonction de la texture du sol.....	49
Le tableau 15. Récapitulatif des techniques les plus utilisées dans l'évaluation de l'érosion éolienne.	55
Tableau 16: Etendue (million ha) de l'érosion hydrique et éolienne selon les continents (d'après Oldeman 1994).....	63

Introduction Générale

Le mot « érosion » trouve son origine dans le verbe latin "erodere", qui signifie « ronger ». Si l'érosion est un processus naturel, il n'est pas nécessaire de l'arrêter complètement, mais bien de la modérer pour la ramener à un niveau acceptable et tolérable. L'érosion hydrique est un phénomène qui transporte et redistribue les sols. Bien que certains processus d'érosion soient graduels, les événements météorologiques extrêmes, tels que des pluies intenses, en sont les principales causes. L'érosion hydrique affecte particulièrement la couche superficielle du sol (l'horizon pédologique A), qui est la plus riche et la plus propice à la vie microbienne et végétale. La disparition totale ou partielle de cette couche réduit la fertilité du sol, sa capacité à retenir l'eau et la diversité biologique. Les matériaux érodés peuvent se redéposer sans causer de dommages importants à court terme. Cependant, dans certains cas, ils sont transportés jusqu'aux cours d'eau, aux lacs et même aux océans, provoquant une dégradation significative de la qualité de l'eau.

À chaque perte de couche superficielle fertile, les effets de l'érosion s'aggravent. Le sol devient de moins en moins capable de maintenir une productivité optimale, de réguler l'écoulement de l'eau et de le répartir de manière équilibrée dans l'environnement. Les conséquences environnementales sont nombreuses : l'érosion est une source majeure de pollution diffuse, entraînant notamment l'eutrophisation des eaux, la contamination par les pesticides et les engrais, ainsi que la turbidité de l'eau.

Le ruissellement, point de départ de l'érosion.

L'érosion des sols se déclenche lorsque les eaux de pluie, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent en emportant les particules de terre. Ce phénomène se produit lorsque :

- ✓ l'intensité des pluies est supérieure à l'infiltrabilité de la surface du sol (intensité > infiltration),
- ✓ ou lorsque la pluie tombe sur un sol déjà saturé par une nappe phréatique.

Ces deux types de ruissellement surviennent généralement dans des contextes très différents, bien qu'une combinaison des deux puisse parfois être observée. Une fois le ruissellement initié, l'érosion peut revêtir plusieurs formes, qui se combinent dans le temps et dans l'espace. D'un point de vue global, on distingue :

- l'érosion auréolaire, ou diffuse,
- et l'érosion linéaire, ou concentrée, le long des talwegs.

Les mécanismes ou processus érosifs dépendent de nombreux facteurs interdépendants : le sol, l'occupation du sol, la topographie et le climat.

Les paramètres de l'érosion sont les différentes informations qui peuvent permettre de caractériser les facteurs de l'érosion. Par exemple, la pente est un paramètre pouvant caractériser le facteur topographie, de même que la dénivelée, l'altitude moyenne, etc. Pour caractériser l'influence du climat, on retiendra les hauteurs de pluie cumulée, pondérées par une information sur l'intensité des précipitations.

Chapitre I

Erosion

Hydrique

EROSION HYDRIQUE

I. Origine Et Mécanismes

L'érosion hydrique est un phénomène complexe qui menace particulièrement les ressources en eau et en sol. Elle se définit comme le détachement et le transport de particules de sol depuis leur emplacement d'origine par différents agents, jusqu'à un lieu de dépôt. Ce processus s'articule autour de trois étapes successives : le détachement, le transport et la sédimentation

Note : 3 étapes caractéristiques : détachement, transport et sédimentation

La pluie et le ruissellement superficiel sont à l'origine du détachement, du transport et du dépôt des particules du sol arrachées. Les figures ci-dessous schématisent l'action des gouttes de pluies et leurs rôles dans l'exécution des 3 phases.

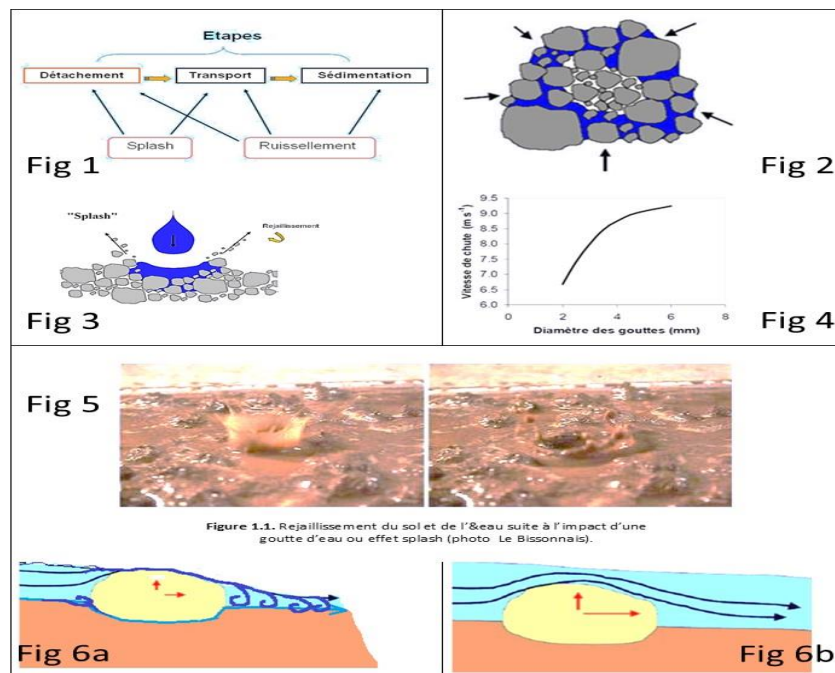


Figure 1. Etapes caractéristiques de l'érosion : détachement, transport et sédimentation

I. 1. Le détachement

Les principaux mécanismes conduisant au détachement sont :

I.1.1. 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 (figure 1-fig2). 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.

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 minéralogiques 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 de la valence des cations (dominance des cations monovalents et des cations bivalents) pouvant lier particules minérales et organiques via les charges négatives présentes.

La désagrégation mécanique sous l'impact des gouttes de pluie (Figure 1-fig3 et fig5, page 2).

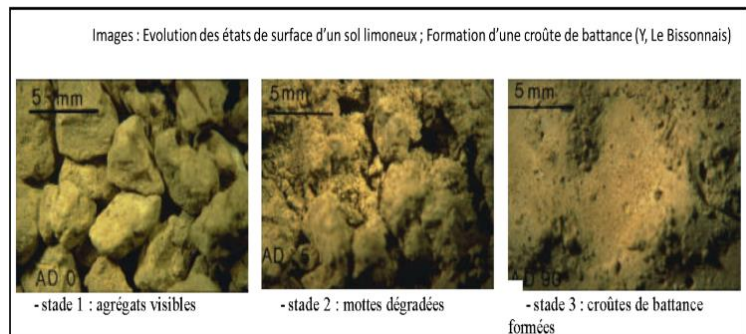
L'impact des gouttes de pluie peut fragmenter les agrégats, en particulier en détachant les particules de leur surface. Ce mécanisme intervient généralement en association avec d'autres processus mentionnés précédemment et nécessite une pluie dotée d'une certaine énergie, variable selon les types de sols. Alors que l'énergie cinétique des gouttes n'est pas absorbée, elle se transforme en une force de cisaillement, provoquant ainsi le détachement et le déplacement des particules de part et d'autres du point d'impact. Les particules détachées par les gouttes de pluie sont généralement des micro-agrégats ou des particules élémentaires de petites tailles.

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.

Ce qui peut être à l'origine de la construction d'une fine couche appelée « Croûte de battance ». Les particules de sol très fines qui sont détachées de la surface par l'impact des gouttes peuvent être aussi piégées entre les éléments plus grossiers et peuvent obstruer les pores de la couche supérieure du sol et réduire considérablement le taux d'infiltration. Cette obstruction augmente les risques de ruissellement en surface et d'érosion. Les sols limoneux sont particulièrement touchés par ce phénomène.

Figure 2. L'état de surface passe par trois étapes :

- Stade 1 : mottes visibles et individualisées
- Stade 2 : mottes anéanties et peu cohérentes
- Stade 3 : apparition de la croûte de battance.



I.1.2. Le ruissellement

Le ruissellement superficiel des eaux est un processus dans lequel l'eau de pluie ou de fonte ne s'infiltré pas dans le sol, mais s'écoule à la surface du terrain. Ce phénomène est étroitement lié à l'érosion des sols car, lorsque l'eau s'écoule à la surface, elle peut entraîner avec elle des particules de sol, provoquant ainsi leur déplacement et leur perte. Le ruissellement superficiel peut être accru par des facteurs tels que la forte intensité des précipitations, l'imperméabilité du sol, le manque de végétation ou les sols dénudés.

L'érosion des sols se développe lorsque les eaux de pluies, ne pouvant plus s'infiltrer dans le sol, ruissellent sur la surface de la parcelle et emportent dans son mouvement les particules de terre. Ce refus du sol d'absorber les eaux en excès 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).

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 à une érosion diffuse et /ou une érosion concentrée. Il est donc à noter qu'il y a détachement de l'érosion par le ruissellement lorsque la **force de friction de l'eau** sur les particules du sol est supérieure à la **résistance du sol au cisaillement**.

Encadré 1 : la croûte de battance formation et conséquences

La formation de la croûte de battance est un processus qui se déroule suite à l'érosion hydrique, où les particules fines du sol, telles que les limons et les argiles, sont lessivées et transportées par les eaux de ruissellement. Ces éléments fins s'accumulent dans les dépressions topographiques où l'eau stagne, conduisant à l'épaississement de la croûte. Cette sédimentation est favorisée par la décantation des particules en suspension dans l'eau stagnante, ce qui renforce la structure de la croûte. La perméabilité de la surface du sol diminue considérablement sous cette croûte, pouvant atteindre des niveaux inférieurs à 2 mm/h pendant les périodes humides. Cette réduction est attribuable à la compaction des particules du sol et à la formation d'une structure plus dense, limitant ainsi l'infiltration de l'eau. Cette diminution de la perméabilité affecte négativement la capacité du sol à absorber l'eau, réduisant ainsi son potentiel à soutenir la vie végétale. Par ailleurs, le microrelief, qui se réfère aux petites irrégularités de la surface du sol, tend à s'estomper à mesure que la croûte de battance se forme. Ce phénomène est en partie dû à l'érosion différentielle et à la sédimentation dans les zones déprimées, ce qui uniformise progressivement le relief. Ultérieurement, même des précipitations de faible intensité peuvent générer un ruissellement significatif en raison de la surface imperméable.



En résumé : La croûte de battance prend naissance à la faveur de zones de dépressions du sol où l'eau stagne, permettant la sédimentation des éléments fins. Les conséquences principales sont une réduction de l'infiltration, un obstacle supplémentaire à l'émergence des graines du sol, un paramètre en faveur du déclenchement du ruissellement.

L'analyse du ruissellement peut être définie en tenant compte des voies de circulation des eaux et des sections d'emmagasinement ou stockage.

- Il peut sur le plan mathématique s'exprimer par l'équation suivante

$$Q_e - Q_s = \Delta q \text{ (entrées, sorties, variation du stockage).}$$

Le ruissellement généré par les précipitations comprend trois composantes :

- le ruissellement de surface (figure 3a);
- l'écoulement hypodermique (de subsurface) invisible à la surface du sol (figure 3b) (*);
- l'écoulement sous-terrain.

L'importance de ces trois composantes varie en fonction du milieu :

- - bassin versant, - type de sol, - de végétation, milieu urbanisé.

Exemple :

En **forêt et terrain plat** → écoulement hypodermique et sous terrain important et ruissellement de surface faible.

Dans le **milieu urbain** → ruissellement de surface important, faible écoulement hypodermique



Figure 3. Écoulement de surface (a) Écoulement hypodermique (b).

(*) : Ce type d'écoulement résulte de la présence d'un obstacle à l'infiltration généré par la présence d'un horizon pédologique compacté (exemple Horizon Bt) ou une couche lithologique (roche mère non altérée)

I. 2. Le transport des particules du sol

Le transport des particules du sol est un phénomène naturel qui résulte de l'action combinée des gouttes d'eau de pluie et des eaux de ruissellement. Ce processus, essentiel à la compréhension de l'érosion des sols, peut être décrit en deux modes principaux : le rejaillissement (effet splash) et le transport par ruissellement (figure 4a et 4b).

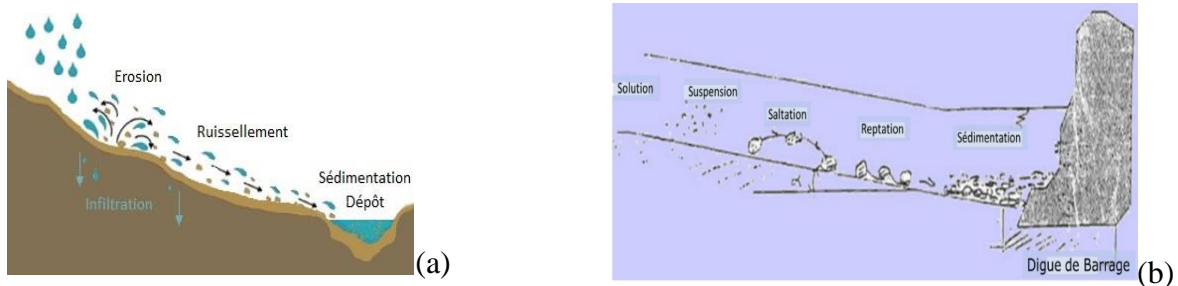
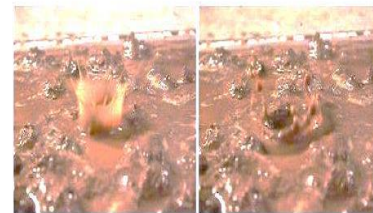


Figure 4. Modes de transport par ruissellement en fonction du milieu

Le rejaillissement, causé par l'impact des gouttes de pluie sur le sol, est un mécanisme qui détache les particules de la surface du sol. Bien que ce mode de transport soit généralement limité en termes de distance et de quantité de particules déplacées, il joue un rôle important dans le détachement initial des particules, spécialement sur les pentes fortes où la gravité amplifie l'effet des gouttes.



Le ruissellement, en revanche, est considéré comme le principale responsable du transport des particules détachées du sol. Ce processus se produit lorsque l'eau de pluie, une fois infiltrée ou non dans le sol, s'écoule sur la surface du terrain. Les eaux de ruissellement peuvent se manifester sous deux formes principales : le ruissellement en surface et le ruissellement canalisé.

- Le ruissellement en surface se produit lorsque l'eau s'écoule uniformément sur le sol, entraînant avec elle des particules de terre. Ce type de ruissellement est souvent associé à l'érosion en nappe, qui se caractérise par un déplacement uniforme des particules sur une grande surface.

- Le ruissellement canalisé ou concentré, se produit lorsque l'eau de pluie s'écoule sur une ligne (ravine, rigole), créant ainsi des voies de concentration du débit d'eau. Ce type de ruissellement est généralement plus érosif, car il concentre l'énergie de l'eau sur des zones spécifiques, entraînant ainsi des quantités plus importantes de particules de sol.

En résumé : Le transport des particules arrachées au sol résulte à la fois aux gouttes d'eau de pluie (par rejaillissement = effet splash) et aux eaux de ruissellement. Le mode de transport par effet splash est généralement négligeable sauf sur pente forte. Alors que les eaux de ruissellement sont les responsables principaux du transport des particules détachées du sol. Les modes de transport par ruissellement varient en fonction du relief, de la quantité d'eau et de la nature du sol, et ils sont clairement illustrés à la figure 1 (page 1). Les figures mentionnées, illustrent ces différents modes de transport par ruissellement, montrant comment l'eau en mouvement peut entraîner les particules du sol et les déposer ailleurs, contribuant ainsi à l'érosion et à la formation de griffes, de ravines et de ravins.

I. 3. La sédimentation

La sédimentation est un processus naturel essentiel qui façonne nos paysages et influence les écosystèmes aquatiques. L'agent principal responsable de ce phénomène est l'eau de ruissellement, qui, en s'écoulant sur le sol, arrache les particules et les transporte vers d'autres lieux. Ces particules ne se déposent pas au hasard ; leur lieu de dépôt est déterminé par les facteurs du relief (replats des lits de cours d'eaux) et les ouvrages construits (les barrages, les retenues et les lacs).

Les particules arrachées se déposent en fonction de plusieurs facteurs : la force d'entraînement de l'eau et les caractéristiques des particules (dimension, densité).

✓ Tout d'abord, les particules les plus grossières, comme les sables grossiers, se déposent près de leur lieu d'origine en raison de leur poids et de leur taille, qui les rendent moins susceptibles d'être transportées sur de longues distances.

✓ Ensuite, les sables fins, plus légers et plus petits, voyagent un peu plus loin avant de se déposer. Enfin, les limons, encore plus fins, peuvent être transportés sur des distances plus grandes, se déposant généralement dans des zones où le courant ralentit, comme les méandres ou les plaines inondables.

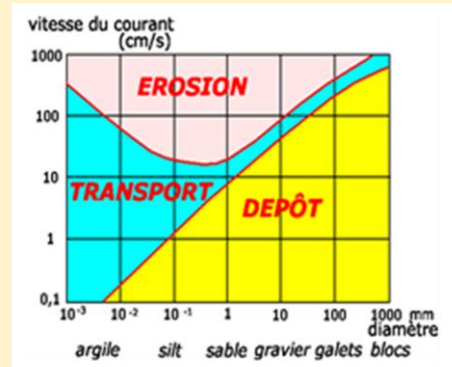
✓ Cependant, les particules les plus fines, telles que les argiles et l'humus colloïdal, ne se déposent pas facilement en raison de leur petite taille et de leur capacité à rester en suspension dans l'eau. Ces particules sont souvent transportées jusqu'à l'embouchure des cours d'eau, les barrages ou les océans.

Par exemple, lorsque **l'eau des rivières** (concentration totale 120mg/l) **se mêle à l'océan** (eau d'une concentration totale 34500mg/l), **la salinité** peut provoquer une floculation, où les particules colloïdales s'agglutinent et forment des agrégats plus lourds qui se déposent au fond. De plus, l'évaporation des eaux stagnées dans les lits des rivières près des plaines (les estuaires ou les deltas) peut également entraîner la précipitation de ces fines particules. C'est pourquoi, dans les lits des rivières ou des oueds, on ne retrouve principalement que du sable, les particules plus fines ayant été transportées plus loin.

Ce processus de sédimentation joue un rôle crucial dans l'écologie des cours d'eau, influençant la qualité de l'eau, les habitats aquatiques et la formation de dépôts sédimentaires qui peuvent, au fil du temps, impacter l'environnement de façon globale.

Encadré 2. Transport des éléments solides. La quantité des éléments transportés dépend des caractères du fluide, vitesse et viscosité, et de ceux des éléments eux-mêmes, taille, forme, densité. L'écoulement de l'eau produit sur l'élément entraîné une force verticale, dirigée de bas en haut, qui s'oppose à son poids apparent. Les petits éléments (argiles, sables) sont arrachés du fond et suspendus dans l'eau. Toute diminution de vitesse produit leur chute. Les éléments plus gros ne s'élèvent pas au-dessus du fond, sauf épisodiquement, à la suite d'une brusque élévation de la vitesse instantanée (saltation), ils roulent ou rampent sur le fond.

Le diagramme de Hjulström (ci-contre) illustre le comportement des particules en fonction de leur taille et de la vitesse du courant. Pour des vitesses fortes, les particules sont arrachées du fond (érosion) et transportées. Pour des vitesses plus faibles, les petites particules déjà arrachées sont transportées, les plus grosses restent sur le fond. On remarque que les particules argileuses demande une plus forte énergie d'arrachement que les sables car elles sont plus cohérentes entre elles et offre à l'eau une surface plus lisse que les sables.



Au cours de leur transport, les grains s'entre-choquent et s'usent: c'est l'abrasion. Bien que faible pour les sables et les argiles, ce phénomène devient important pour les graviers et les galets qui diminuent de taille et acquièrent des formes arrondies

En Résumé

L'agent responsable de la sédimentation est l'eau de ruissellement. Les particules arrachées du sol se déposent entre le lieu d'origine et le point final de leur trajet en fonction de :

- - leur dimension - leur densité - la capacité de transport du ruissellement ou du cours d'eau.

Les particules granulométriques du sol se déposent dans l'ordre suivant :

- Sables Grossiers -- Sables fins -- Limons.

Les argiles et l'humus colloïdal sont généralement transportés jusqu'à l'embouchure du cours d'eau où il se dépose soit après évaporation de l'eau, soit après floculation. C'est pour cela que l'on trouve presque que du sable dans les lits d'Oued ou de rivière.

Chapitre II

Formes de

l'Erosion

Hydrique

Formes De L'érosion Hydrique

II.1. L'érosion en nappe, aréolaire ou laminaire "sheet erosion"

L'érosion en nappe, aréolaire ou laminaire constitue le stade initial de la dégradation des sols par érosion. Cette forme d'érosion, également appelée érosion diffuse, se caractérise par un décapage uniforme du sol sur l'ensemble de son horizon pédologique de surface. Elle est causée principalement par l'écoulement de l'eau de pluie sur un sol exposé, nu ou à couverture végétale réduite.

L'érosion en nappe peut se manifester sous différentes formes :

- ✓ L'érosion en nappe (sheet erosion) correspond à une érosion uniforme de la surface du sol, où une fine couche de terre est emportée par le ruissellement.
- ✓ L'érosion aréolaire, se traduit par la disparition de petites parties du sol, souvent sous forme de taches ou de zones circulaires, généralement dues à des conditions climatiques particulières ou à une exposition accrue.
- ✓ L'érosion laminaire, implique l'enlèvement de couches minces et régulières du sol, résultant d'un écoulement d'eau en nappe qui s'intensifie progressivement.

Cette érosion diffuse est peu visible à l'œil nu sur une année, voire sur plusieurs années, car elle ne se manifeste pas par des ravines ou des fissures spectaculaires. Cependant, ses effets à long terme sont dévastateurs : elle entraîne une perte progressive de la fertilité du sol, une réduction de la qualité agricole et une baisse des rendements des cultures. De plus, cette érosion peut aggraver les inondations en aval, car le sol lessivé ne parvient plus à retenir l'eau de manière efficace.

L'érosion en nappe, aréolaire ou laminaire sont donc des phénomènes insidieux, mais qui nécessite une attention particulière pour prévenir sa progression et éviter des dégâts environnementaux et économiques plus importants à l'avenir.

Le déclenchement de l'érosion en nappe, entraîne un déplacement des particules par l'effet "splash" à courte distance et ensuite par le ruissellement en nappe. La battance des gouttes de pluie envoie des gouttelettes et des particules dans toutes les directions. En fait, ce n'est qu'après formation des flaques et débordement de l'eau non infiltrée d'une flaque à l'autre, que naît le ruissellement en nappe. Celui-ci s'étalant à la surface du sol gardera une faible vitesse même sur des pentes de 5 à 10 % à cause de la rugosité du sol (mottes, herbes, feuilles, racines, cailloux, etc...) qui l'empêchent de dépasser le seuil limite de 25 cm/seconde. Le déplacement des sables plus lourds ou les argiles plus cohérentes, nécessite des vitesses d'écoulement supérieures à 25 cm/seconde (Hujlstrom 1935 ; in Rosse, 1994).

Indicateurs de l'érosion en nappe

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 sur une année, d'une année à l'autre ou sur quelques années successives.

Sur le terrain, l'un des signes les plus visibles de l'érosion en nappe est la présence de plages de couleur claire dans les zones les plus affectées. Par ailleurs, un autre symptôme caractéristique

de ce type d'érosion est la remontée des cailloux en surface due à l'action des outils de travail du sol. Les paysans qualifient ce phénomène en disant que "les cailloux poussent". En réalité, il s'agit d'un déplacement de l'horizon humifère et d'un lessivage du sol en profondeur, qui font remonter les cailloux à la surface. La conséquence directe de l'érosion en nappe sur les parcelles agricoles est le faible rendement des parties affectées, car elles disposent de faibles teneurs en nutriments. Les agriculteurs constatent un rendement plus faible au haut des pentes et sur les buttes.

Les conséquences de l'érosion en nappe sur le sol

L'érosion en nappe modifie graduellement le relief à la surface d'un champ labouré. On peut observer :

- le nivellement de la surface du sol par rabotage des mottes et remplissage des creux, avec formation de pellicules de battance (épaisseur = 1 mm).
- la squelettisation des horizons superficiels par perte sélective des matières organiques et des argiles, laissant en place une couche superficielle dominée par les sables et les graviers.
- le décapage de l'horizon A humifère laissant apparaître des plages de l'horizon minéral de couleur plus claire de l'horizon minéral B ou C.

Rosse et al., (2012), notent qu'en région d'Afrique du nord, les pluies sont beaucoup moins abondantes, les sols souvent neutres et riches en argiles gonflantes saturées en calcium, l'érosion en nappe reste faible (1 à 20 t/ha/an).



Avec le décapage de la couche superficielle du sol et au cours des temps, les racines sont plus exposées en surface

Figure 5. Photos illustratives de l'érosion en nappe en plein paysage.

Paramètres d'érodibilité.

Hjulstrom (1935) a étudié l'érodibilité de matériaux terreux de taille croissante en fonction de la vitesse des écoulements dans un canal. Le diagramme de Hjulström (figure 6) montre qu'il existe trois secteurs en fonction de la vitesse des eaux et du diamètre des particules des matériaux terreux. En fait, il renseigne sur des informations très importantes Sur **la nature, la taille** et la vitesse **d'écoulement**.

1. **Les matériaux** les plus sensibles à l'arrachement par le ruissellement ont une texture voisine des sables fins de 0,1mm. Les matériaux plus argileux sont plus cohérents. Les matériaux plus grossiers ont des particules lourdes qui exigent une vitesse supérieure du fluide.

2. Lorsque les écoulements se produisent à une vitesse faible (25 cm/seconde), ils ne peuvent éroder les matériaux. Pour prévenir l'**érosion** linéaire, il est donc essentiel de réduire la vitesse

et de répartir l'écoulement. Cela souligne la nécessité de mettre en place des dispositifs permettant de dissiper l'énergie du ruissellement.

3. Le **transport** des particules fines, argileuses et limoneuses, s'effectue facilement, même à des vitesses faibles. Cependant, pour des matériaux plus grossiers que les sables fins, le passage de la zone d'érosion à la zone de **sédimentation** est très rapide. On comprend ainsi pourquoi les fossés d'évacuation des eaux de ruissellement peuvent être érodés s'ils sont trop étroits ou trop pentus, ou au contraire se retrouver ensablés par les matériaux grossiers qui ne parviennent pas à s'écouler.

Au-delà d'une vitesse de **25 cm/seconde**, le ruissellement peut non seulement transporter des sédiments fins, mais aussi attaquer le sol et former des rigoles hiérarchisées, où la vitesse d'écoulement augmente rapidement. On passe alors de l'érosion diffuse à l'érosion concentrée, caractérisée par l'apparition de griffes, rigoles et ravines.

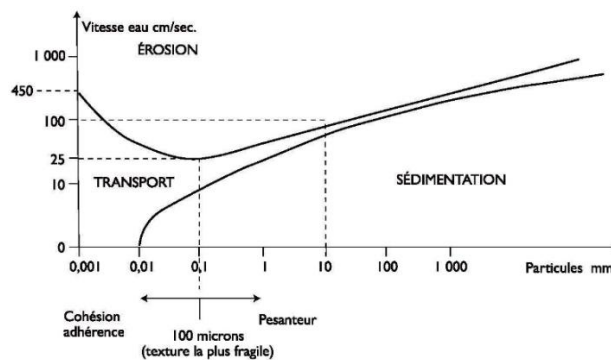


Figure 6. Diagramme de Hjulström

II.2. L'érosion linéaire (micro-channel ou Rill Erosion)

Définition du Ruissellement

Le **ruissellement**, d'un point de vue hydrologique, désigne le phénomène d'écoulement des eaux à la surface des sols suite à une pluie. Il s'oppose au phénomène d'infiltration. Le ruissellement de surface est le mouvement de l'eau se produisant sur les versants en dehors du réseau hydrographique (Mounirou, 2012). Dès que la circulation de l'eau parvient au réseau hydrographique, on parle d'**écoulement**.

Selon la **théorie de Horion sur l'intensité des pluies**, le ruissellement se produit lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration des horizons superficiels du sol. Au cours d'une pluie, cette capacité d'infiltration diminue progressivement, car la porosité de surface se sature ou 'se referme'. Lorsque ce seuil est atteint, appelé « temps d'imbibition », l'intensité de la pluie excède celle de l'infiltration. L'excédent d'eau s'accumule alors et s'écoule en filets. Ces filets, porteurs d'énergie, sont capables d'éroder le sol en arrachant des particules et de transporter les particules grossières comme des sables et des graviers.

Le ruissellement peut également survenir lors de pluies peu intenses mais prolongées, selon la **théorie de la saturation du sol**. Dans ce cas, la durée de la pluie est suffisante pour saturer les horizons superficiels du sol. Lors de simulations de pluies longues durées, on observe que le ruissellement se stabilise après quelques dizaines de minutes, puis augmente à nouveau pour atteindre un nouveau plateau correspondant à une infiltration stabilisée, mais très faible. C'est

notamment le cas des pluies dépassant 100 mm sur un sol labouré, où la semelle de labour peut limiter l'infiltration.

Selon Salomon et al., (2000), le ruissellement dépend de **la contribution partielle de la surface du sol**. Dans la nature, il ne s'étend pas uniformément sur toute la surface d'une parcelle ou d'un bassin versant, mais se concentre sur certaines zones. Par exemple, il se développe sur les surfaces nues, tassées ou recouvertes d'une croûte de battance, ainsi que dans les fonds de vallée où la nappe phréatique, alimentée par l'ensemble du bassin, sature des zones marécageuses.

En résumé, deux processus majeurs pour expliquer l'apparition du ruissellement sont à retenir : le refus d'infiltration d'un sol non saturé dit ruissellement hortonien d'une part, et le refus d'infiltration d'un sol saturé d'autre part. Toutefois, les deux mécanismes ne sont pas exclusifs, ils peuvent se succéder sur un même site ou lors d'un événement pluvieux.

Indicateurs de l'érosion linéaire

Les observations sur le terrain indiquent que lorsque l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration de la surface du sol, il se forme d'abord des flaques; ensuite ces flaques communiquent par des filets d'eau et dès que ces filets d'eau atteignent une certaine vitesse, (>25 cm/seconde), ils acquièrent une énergie propre en mesure d'initier une érosion limitée dans l'espace selon les lignes d'écoulement préférentielles. Cette énergie n'est plus dispersée sur l'ensemble de la surface du sol, mais concentrée sur des lignes de plus forte pente. L'érosion linéaire est donc un indice de l'organisation imminente du ruissellement. Une fois le ruissellement déclenché, l'érosion hydrique peut se manifester (Le Bissonnais et al., 2004). En fonction des conditions du milieu (pente, longueur de la pente, occupation du sol, tassement, ...) l'eau acquièrent une vitesse et une énergie cinétique capable d'entailler le sol et d'emporter des particules de plus en plus grosses: non seulement des argiles et des limons comme l'érosion en nappe, mais des graviers ou des cailloux et même des blocs.

Formes d'érosion linéaire

L'érosion linéaire se manifeste par des creusements linéaires qui se dessinent à la surface du sol, prenant diverses formes et dimensions (figure 7 : griffes, rigoles, ravines, etc.). Elle apparaît lorsque le ruissellement en nappe se concentre et s'organise, creusant progressivement des formes de plus en plus profondes (tableau ?).

L'érosion provoquée par les écoulements concentrés génère des rills de petites dimensions (<1m de diamètre et de profondeur) qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres de longueur. Le développement de ces rills peut augmenter les taux d'érosion jusqu'à un ordre de grandeur plus élevé, causé par des écoulements de surface non concentrés (Cerdan et al., 2002). En raison de leur aspect très erratique et de leur facilité à être détruits par la gestion des sols, les processus d'érosion sous forme de rills sont difficiles à quantifier (Wells et al., 2016).

On distingue :

- Les Griffes : lorsque les petits canaux mesurent quelques centimètres de profondeur (moins de 10 cm) (figure 8a).

- Les Rigoles : lorsque les canaux dépassent 10 cm de profondeur, mais restent encore effaçables par les labours et autres travaux du sol (figure 8b). Divers tracés de rigoles peuvent être observés sur les bassins versants (figure 7).

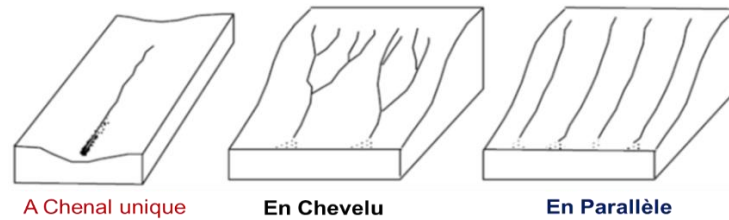


Figure7. Divers tracés des rigoles sur le terrain.

Sur un bassin versant ou une parcelle, l'érosion en rigole succède à l'érosion en nappe par concentration du ruissellement dans les dépressions. À ce stade, les rigoles ne convergent pas, mais forment des ruisselets parallèles. En résumé, l'érosion linéaire représente un stade intermédiaire de l'érosion hydrique, entre l'érosion en nappe et l'apparition de ravines plus prononcées, qui nécessitent des mesures de protection spécifiques. (fig. 7a).

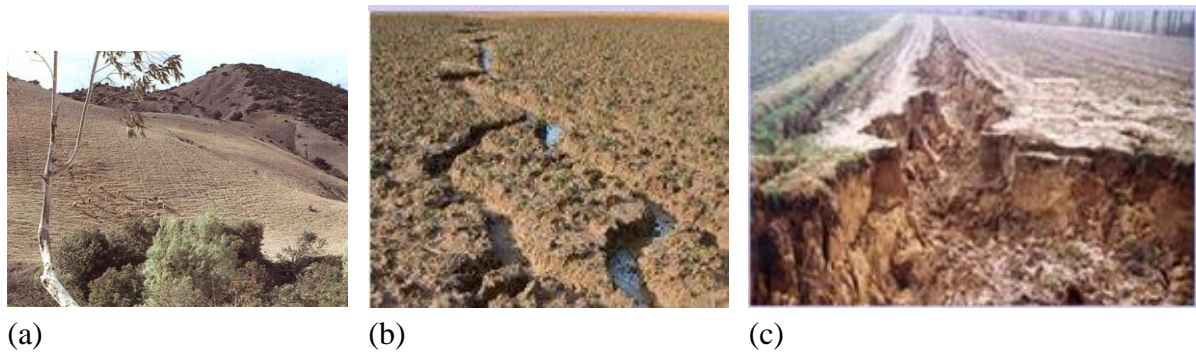


Figure 8. Principales formes d'érosion linéaire (a) Griffes, (b) Rigoles, (c) Ravines.

On parle de :

- ✓ Nappe ravinante, lorsque les creux ne dépassent pas 10 à 20 cm mais que leur largeur atteint plusieurs mètres.
- ✓ Ravines, lorsque les creux atteignent plusieurs dizaines de centimètres (plus de 30 cm) et, plus particulièrement, lorsqu'ils ne peuvent plus être effacés par les labours.

À l'intérieur des ravines, on peut encore distinguer (Tableau 1).

- Les petites ravines, dont le lit est encore encombré de végétation herbacée et surtout arbustive. Ces petites ravines peuvent être stabilisées rapidement par des méthodes biologiques.
- Les grandes ravines, qui peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres. Le canal central de ces formations est parsemé de blocs rocheux, témoins d'un charriage important et d'une certaine torrencialité. Étant donné que ces fonds sont mobiles, il n'est plus question de les stabiliser uniquement par des méthodes biologiques. Il est alors nécessaire de recourir à des seuils cimentés et à des techniques mécaniques, souvent coûteuses.

L'érosion provoquée par les écoulements concentrés génère des rills de petites dimensions (<1m de diamètre et de profondeur) qui peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres de longueur. Le développement de ces rills peut augmenter les taux d'érosion jusqu'à un ordre de grandeur

plus élevé, causé par des écoulements de surface non concentrés (Cerdan et al., 2002). En raison de leur aspect très erratique et de leur facilité à être détruits par la gestion des sols, les processus d'érosion sous forme de rills sont difficiles à quantifier (Wells et al., 2016).

Tableau 1. 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

Les Ravines en « V »

Les ravines sont une forme d'érosion linéaire très fréquemment observées dans la nature sur des matériaux homogènes, plus ou moins meubles, tels que des formations sablo-argileuses, argileuses, marneuses ou schisteuses. Les ravines peuvent être le résultat de l'érosion continue de l'eau de pluie, de la fonte des neiges ou du ruissellement. Les versants de ces ravines évoluent par altération de la roche : en saison froide, cette altération est causée par l'alternance de gelées et de soleil ; en saison chaude, elle résulte de l'alternance de périodes sèches et d'averses.

En milieu méditerranéen, on observe une altération des marnes et des schistes qui peut atteindre 4 à 10 mm par an. L'enfoncement de la ravine se produit lors des averses exceptionnelles, généralement une à deux fois par an. Ces événements suffisent à éliminer toutes les particules accumulées durant l'année au fond de la ravine et à entailler le lit de celle-ci par abrasion des matériaux charriés par le ruissellement.

Lilin et Koohafkan, (1987), distinguent les formes suivantes :

- Les petites ravines dont le lit est encombré de végétation herbacée et arbustive et qu'on pourra corriger avec des méthodes biologiques (plantations d'herbes au centre et d'arbres au pied des berges).
- Les ravines moyennes taillent la couverture pédologique jusqu'à la roche mère altérée (Horizon C) nécessitant la mise en place d'un support de culture pour la prise des racines.
- Les grandes ravines torrentielles, qui peuvent s'étaler sur plusieurs kilomètres, le canal central est tapissé de blocs rocheux, témoins d'un charriage de pierres important qui empêchent la fixation de toute végétation.



Figure 9. Ravinement sur sols rouges dans la région de Tlemcen (Algérie) (Rosse et al., 2012).

Les Ravines en « U »

Ce type de **ravines en U** s'observe fréquemment dans la nature sur des matériaux hétérogènes. Elles peuvent se former sous deux situations principales :

- ✓ Cas de sol sur un fond constitué de matériaux résistants, tels que des roches dures ou des dépôts compacts. Lorsqu'une crue exceptionnelle se produit, l'eau, incapable de percer ce fond solide, cherche un équilibre en augmentant la largeur du chenal. Cela se traduit par un élargissement latéral de la ravine, souvent accompagné d'effondrements des parois (figure 10).

- ✓ Le second scénario se présente lorsque la couche résistante est située en surface. Ici, le ruissellement, guidé par la topographie, creuse profondément le matériau meuble sous-jacent. Cette érosion continue jusqu'à atteindre une nappe d'eau temporaire ou permanente. Une fois cette nappe atteinte, l'eau exerce une poussée latérale sur le bas du versant, sapant progressivement la stabilité des berges. Ce processus, connu sous le nom de "sapement de berges," conduit inévitablement à l'effondrement des parois, modifiant ainsi la morphologie de la ravine.

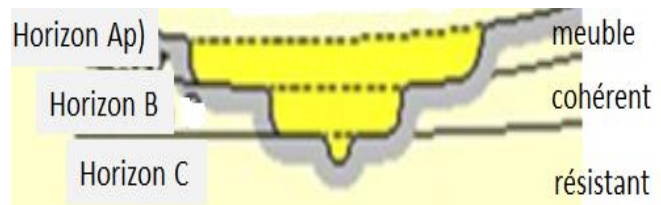


Figure 10. Processus de ravinement en U, sur une parcelle de grandes cultures de faible pente. Jaune : partie de sol emportée par le ruissellement. Ap : Hz A labouré.

Les Tunnel (tunneling)

L'érosion en tunnel, ou tunneling, se développe dans des environnements où la pente est faible et où la surface est composée de matériaux fissurés, tels que des sols riches en argiles gonflantes (comme les vertisols et les sols bruns tropicaux) ou des marnes riches en gypse ou en d'autres minéraux solubles, une caractéristique commune dans le bassin méditerranéen (Hardie et al., 2007).

Lors des orages de fin de saison sèche, les eaux pénètrent dans ces sols fissurés jusqu'à la roche altérée. Elles ruissellent alors dans ces fissures jusqu'en bas de pente où elles peuvent former des ravines régressives.

Les fentes de retrait et les fissures dans lesquelles s'engouffre le ruissellement hypodermique subissent une transformation progressive en tunnels (figure 11). Ces derniers s'effondrent, donnant naissance à des ravines régressives qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines de mètres lors de périodes de fortes précipitations. Seul le labour en sec, réalisé avant les précipitations, est capable de colmater ces fissures et de forcer l'eau à pénétrer l'intégralité de la couche supérieure du sol, évitant ainsi l'infiltration.

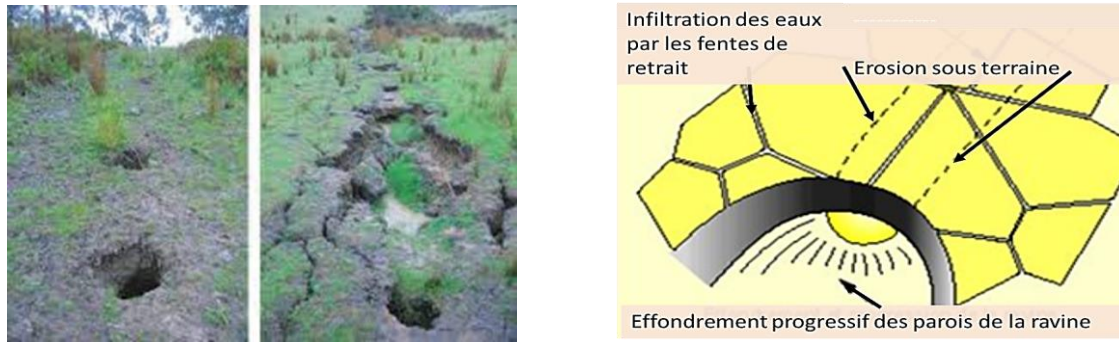


Figure 11. Ravine en tunnel, sur sol lourd à argiles gonflantes de type vertisols.

II.3. L'érosion en masse

Les mouvements de masse concernent un volume à l'intérieur de la couverture pédologique. On attribue à l'érosion en masse tout déplacement de terre selon des formes non définies, comme les mouvements de masse, les coulées de boue et les glissements de terrain.

Ces mouvements peuvent se limiter à des décollements circonscrits d'une couche de sol ayant un « point de départ » vers une zone d'accumulation qui peut être une zone de rupture de pente naturelle ou simplement une route (figure 12). Ce phénomène est particulièrement fréquent dans les formations de schistes et de marnes en cours d'altération.



Figure 12. Différentes formes d'érosion de masse

En fonction de l'étendue du phénomène, dans certains cas seul les pouvoirs publics (ministères, directions de wilaya) disposent de moyens techniques, financiers et légaux, pour maîtriser les problèmes de glissement de terrain, souvent catastrophiques, et pour imposer des restrictions d'usage aux terres soumises à des risques majeurs de mouvement de masse. Les phénomènes de mouvement de masse sont très nombreux dont on peut citer :

Les glissements :

Ce 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 (figure 13). 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.

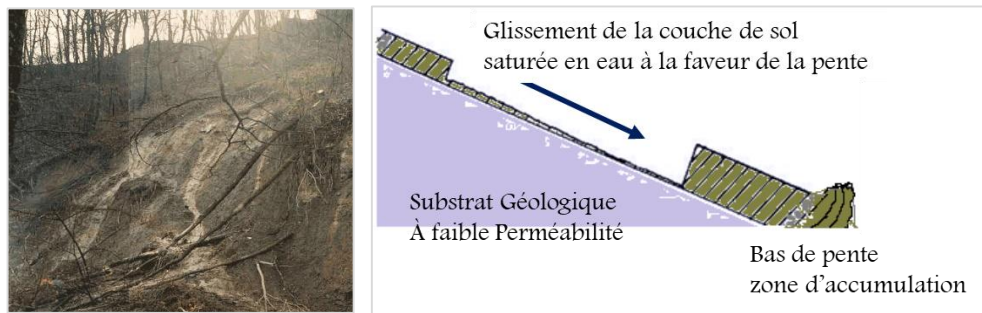


Figure 13. Décollement de la couverture pédologique sur pente assez forte.

Coulées boueuses et laves torrentielles

Ce type de mouvement se fait sous forme de 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 sol, de graviers et de blocs de roches. La totalité des matériaux fins des horizons pédologiques de surface accompagne le mouvement contrairement aux cailloux qui se stabilisent dans les zones de rupture de pentes.

Les coulées boueuses consistent en la propagation de matériaux sans cohésion ou ayant perdu leur cohésion dès la mise en mouvement. Les matériaux intimement mélangés à une importante quantité d'eau (figure 14a), ayant franchi sa limite de liquidité, évoluent à la faveur de la pente de façon semblable à un liquide (figure 14b).

Une lave torrentielle ne survient qu'à l'intérieur de chenaux préexistants caractérisés par une inclinaison souvent forte (pente $> 5^\circ$ en général). Par opposition, une coulée boueuse survient suite à une instabilité de terrain dans la pente, sans qu'il y ait un chenal. **Une lave torrentielle** est un mélange de matériaux solides (blocs, graviers, etc.) transportés par un fluide visqueux, composé de sédiments gorgés d'eau suite à de fortes pluies. Les matériaux susceptibles de perdre ainsi leur cohésion sont des argiles, des limons, des roches décomposées ou des éboulis fins (figure 14c). L'eau peut pénétrer au sein des matériaux par infiltration avant le déclenchement de la coulée ou au moment de la rupture par concentration des eaux de ruissellement.

Ce mouvement, sous l'action de la gravité, prend naissance dans le réseau de drainage, de chenaux préexistants et des voies naturelles de circulations des eaux excédentaires caractérisés par une inclinaison souvent forte (pente $> 5^\circ$ en général). Lorsqu'une coulée boueuse rejoint un chenal d'écoulement et se mélange à un fluide clair ou visqueux, on parle alors de lave torrentielle (Smiri, 1987).

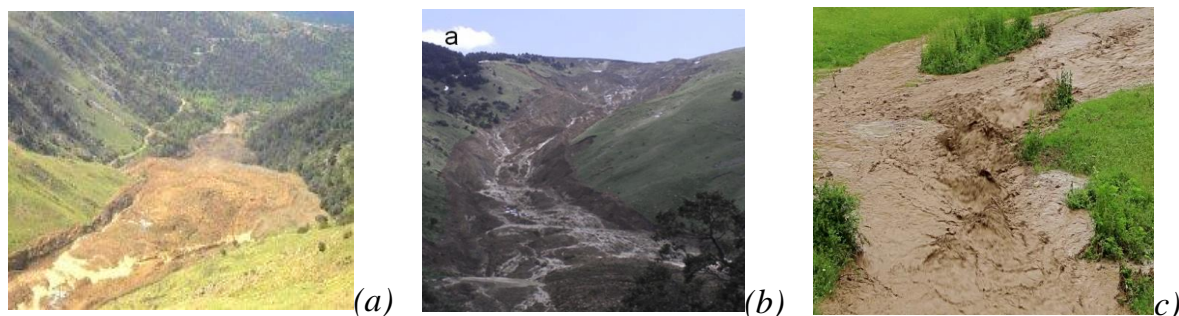


Figure 14. Coulées boueuses et laves torrentielles

Le phénomène de mouvement de masse est observé dans plusieurs régions d'Algérie. Les zones instables touchées par ces glissements sont alimentées par des eaux d'origine naturelle, (précipitations et couvertures neigeuses) et des eaux d'origine anthropique (fuites sur les réseaux d'eau potable et d'eaux usées (Bougdal, 2013). Dans le cas de la région d'Illilten (figure 14b), Melbouci et Bouaziz (2014) considèrent que l'importante couverture neigeuse de l'hiver 2011 (d'une épaisseur supérieure à 1 m) suivie par d'intenses pluies a complètement saturé le terrain et a conduit à la réactivation catastrophique des glissements.

Les formes locales

Il s'agit d'éboulements rocheux ou d'effondrements de versants qui entraînent **des glissements localisés**. Ceux-ci sont très fréquents au sommet des ravines : ils entraînent l'éboulement de la partie supérieure de la ravine et favorisent l'érosion régressive du fond de la ravine qui progresse alors vers le sommet de la colline.

Les causes et les processus des mouvements de masse sont les suivants :

- D'une part, du déséquilibre entre la masse de la couverture pédologique, l'eau qui s'y trouve stockée et les végétaux qui la couvrent ;
- D'autre part, les forces de frottement de ces matériaux sur la roche altérée en pente sur laquelle ils reposent.

Les facteurs des mouvements de masse sont : Les secousses sismiques, les fissurations dues à l'alternance gel/dégel ou à la dessiccation des argiles gonflantes, l'altération de la roche et l'humectation de la couverture pédologique jusqu'à saturation favorisent ce déséquilibre.

○ 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 (marnes, schistes, roches micacées, gneiss).

L'activité humaine peut accélérer la fréquence de ces mouvements de masse en modifiant la géométrie externe du versant pour divers objectifs, tels que : le terrassement, le creusement d'un talus pour réaliser une route ou des habitations, la surcharge d'un versant par des remblais, la modification des écoulements naturels, l'érosion au pied d'un versant par une rivière dont le cours est modifié, etc.



Figure 15. Exemple de mouvements de masse menaçant les voies de circulation

II.4. L'érosion des berges

Par définition, la berge est la partie latérale plus ou moins escarpée du lit d'un lac ou d'un cours d'eau qui peut être submergée sans que les eaux ne débordent. Elle correspond au lit mineur du

plan d'eau et ses limites sont inférieures à la ligne des hautes eaux. L'érosion des berges (**bank erosion**) est un phénomène qui tend à prendre de l'ampleur dans le contexte actuel des changements climatiques et la perte de ces surfaces menace bon nombre d'exploitations agricoles des plaines alluviales.

C'est une forme d'érosion due à la dissipation de l'énergie de l'eau dans les lits des cours d'eau et les rivières. L'énergie de ces dernières est capable, de manière régulière ou accidentelle (lors des inondations) d'emporter une partie des berges (figure 16). On appelle ce processus le sapement des berges. Il se produit également dans les ravins en formation lorsque l'eau du ruissellement attaque les assises du ravin. Ce type d'érosion est étroitement lié au volume et à la vitesse de l'eau, qui dépend de la pente et du débit.

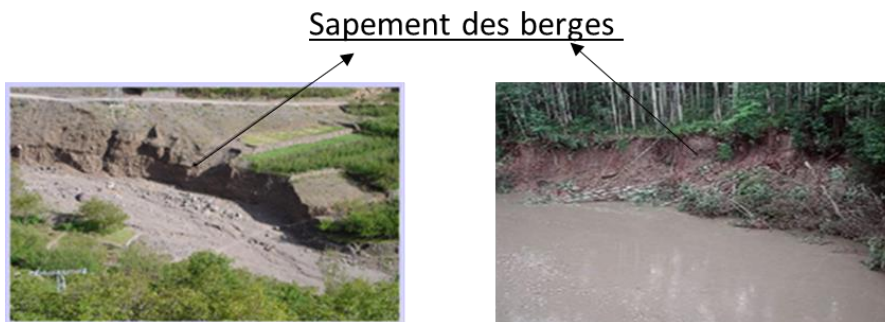


Figure 16. Erosion hydrographique dans le lit d'une rivière

Les mesures de protection des berges

- Renforcement structurel : Utilisation de murs de soutènement, de blocs ou de gabions.
- Revêtements végétaux : avec végétaux à racines profondes pour renforcer le sol.
- Régulation des débits : Maintenir un débit stable pour éviter les crues excessives. - Aménagement des berges : Créer des zones tampons pour réduire l'impact des courants.
- Practices durables : - Reboisement et conservation de la végétation : Préserver ou restaurer les zones riveraines pour stabiliser les sols. - Réglementation de l'extraction de matériaux : Limiter ou interdire l'extraction dans les zones sensibles.
- Surveillance et monitoring : - Études de géomorphologie : Analyser les zones à risque et suivre l'évolution de l'érosion.

En guise de conclusion sur l'importance des pertes du sol pour les différentes formes d'érosion, nous consignons cette comparaison dans le tableau 2, ci-dessous :

Tableau 2. Quelques ordres de grandeurs de pertes de sol par type d'érosion.

Type d'érosion	Perte du sol	Erosion ravine	100 T/ha/an
Erosion en nappe	1 T/ha/an	Erosion en badlands	1 000 T/ha/an
Erosion en rigole	10 T/ha/an	Sapement des berges	10 000 T/ha/an



Figure 17. Badlands formées sur des argiles rouges, ultime stade de l'érosion des sols

Chapitre III

Moyens et Techniques de Quantification de l'érosion hydrique

Moyens et techniques de quantification

Introduction

De nombreux travaux de recherche ont tenté d'établir des relations permettant d'estimer les quantités de sols perdu, à partir de nombreuses mesures en modèle réduit ou sur le terrain (fleuves, cours d'eau, rivières,...etc. Les différentes formules proposées produisent rarement des résultats comparables. Ces formules évaluent la capacité de transport solide constituée par des sédiments présents au fond du lit ou sur les berges.

La quantification de l'érosion des sols est essentielle pour comprendre l'impact environnemental et les risques associés, ainsi que pour développer des stratégies de gestion durable des terres. Plusieurs moyens et techniques permettent de mesurer et de quantifier l'érosion des sols. Les méthodes utilisées dans l'évaluation et la cartographie de l'érosion varient en fonction des objectifs, des moyens et des échelles de travail.

III.1. Méthodes directes: méthodes de terrain

Ces méthodes se basent sur des observations directes et des mesures faites sur le terrain.

- **Profil de sol** : L'examen des profils de sol peut fournir des informations sur la profondeur de l'érosion, notamment la perte de la couche arable.
- **Mesures des pertes de sol** : Des balises et des plots de mesure peuvent être installés pour estimer la quantité de sol perdu dans des zones spécifiques.
- **Marquage des repères** : On peut utiliser des repères pour mesurer le déplacement du sol au fil du temps. Cette méthode peut être coûteuse et exige du temps, mais elle permet d'obtenir des données locales et spécifiques.

III.1.1. Mesures topographiques

Ce sont des mesures de détermination de paramètres spécifiques tels que l'état de surface du sol. Le principe de base est la prise de données mesurables, après des travaux culturaux, relatives au suivi de l'évolution topographique de la surface du sol, notamment : Mesure par Rugosimètre : on estime la variation de la hauteur des agrégats du sol par rapport à un plan de référence. Voici un exemple de dispositif de mesure de la rugosité:

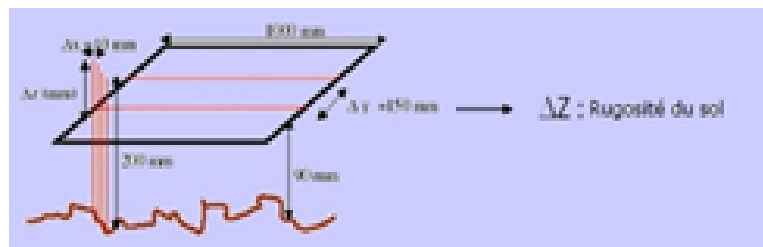


Figure 18. Dispositif de mesure de la rugosité

Le principe de mesure est comme suit : (i) Boîte dont le cadre est placée à 90 mm (9cm) de hauteur au-dessus du plan de référence ; (ii) quatre peignes espacés tous les 150 mm (Dy), dont deux se trouvent sur le cadre et les deux autres sont localisés ensuite par une translation

contrôlée de la boîte- chaque peigne à une longueur de 1000 mm et comporte 100 aiguilles espacées de 10 mm (Dx) ; (iii) chaque aiguille fait 200 mm de longueur (iv) ; on mesure la partie supérieure dépassant du cadre (Dz, en mm).

Ce type de mesures peut aussi recommandées pour le suivi de l'évolution des ravines : on mesure la variation des dimensions de certaines sections des ravines après chaque évènement pluvieux pour estimer l'état d'approfondissement du processus érosif avec le temps.

III.1.2. Simulation de pluies

La **quantification de l'érosion par la simulation de pluie** est une méthode utilisée pour évaluer l'érodibilité des sols et comprendre les processus d'érosion dans différents environnements.

Principes de la Simulation de Pluie

La simulation de pluie permet de reproduire des conditions de pluie contrôlées pour étudier l'érosion des sols. Elle est particulièrement utile dans les régions où les événements de ruissellement sont rares ou imprévisibles, comme dans les zones semi-arides. Par ailleurs, cette technique peut être utile dans la prédiction des mécanismes d'érosion et d'intensité dans le sillage des changements climatiques.

Méthodes et Equipements

Les simulateurs de pluie utilisent généralement des ajutages pour créer une pluie artificielle sur des parcelles de sol. Ces dispositifs peuvent être ajustés pour simuler différentes intensités et durées de pluie, permettant ainsi de tester l'érodibilité de divers types de sols sous conditions contrôlées

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 avantages relatifs à :

- la mobilité des dispositifs, adaptation à diverses situations de terrain
- la capacité à produire différentes intensités, de hauteur et d'énergie semblables aux 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.

La mise en place des équipements et du protocole de mesure

Pour pouvoir effectuer des simulations de pluie sur le terrain, il est nécessaire de confectionner les parcelles de mesure semblable à ce qui illustré sur les images ci-dessous. Il y a plusieurs types de simulateurs des plus simples ou plus complexes. Deux d'équipements sont présenté :

Le modèle mini-simulateur type ORSTOM

C'est un prototype très simple qui peut être même confectionné par l'utilisateur, il est constitué d'un réservoir d'eau, d'un gicleur simulant les gouttes de pluies (hauteur, intensité et durée), d'une aire de sol reconstituée portée par une plaque avec un exutoire et d'un contenant pour recueillir les eaux ruisselées.

La figure 19 représente un simulateur mis au point par Asseline et Valentin (1979), il n'arrose que quelques mètres carrés. Il comprend un gicleur fixé sur un système qui se balance au

sommet d'un derrick de 4 m de haut. La variation de l'angle de balancement permet de simuler des séquences de pluies d'intensités différentes programmables. Le ruissellement, et sa charge solide sont mesurés au bas d'une parcelle de 1 m². Ce dispositif permet de suivre avec précision, la dynamique de l'infiltration, et de tester la détachabilité de la surface d'un sol, mais pas l'érosion, car la faible longueur de pente ne permet pas à l'énergie du ruissellement de s'exprimer. Cette méthode a donné lieu à de nombreuses applications par les pédologues et les hydrologues dans les pays tropicaux, tempérés et méditerranéens. Elle exige malgré tout beaucoup d'eau (100 à 600 litres), du personnel (2 à 4 techniciens entraînés), du matériel et ne s'applique facilement que sur des pentes de 2 à 30 % et sur des sols dont l'infiltration est réglée par l'état de surface et non pas par l'engorgement des horizons profonds.



Figure 19. Parcelles expérimentales pour l'étude des effets érosifs via les pluies simulées.

Le modèle de l'irrigateur manuel à rampe

Ce dispositif (figure 20) permet de simuler des pluies de différentes intensités qui peuvent atteindre 150 mm/h sur des échantillons de sol correspondants à la « surface élémentaire représentative » d'une parcelle cultivée (10 m² sur 0,3 m de profondeur), avec une pente variant de 0 à 20%.

L'irrigateur manuel à rampe est une version simplifiée à l'extrême de simulateur de pluies dont le cadre de mesure est semblable à celui qui est utilisé pour le simulateur ORSTOM, ou peut être adapté au mouvement des bras porteurs ou à la répartition de l'hétérogénéité de la surface du sol.



Figure 20. Dispositif du modèle de l'irrigateur manuel à rampe

Le Modèle INRA d'Orléans

Le dispositif permet de simuler des pluies de différentes intensités (10 à 60 mm/h) sur des échantillons de sol correspondants à la « surface élémentaire représentative » d'une parcelle cultivée (10 m² sur 0,3 m de profondeur), avec une pente variant de 0 à 20%. Les mesures effectuées ont pour objectifs principaux l'acquisition de références expérimentales nécessaires à l'élaboration de modèles (stabilité structurale, formation des croûtes de battance, mobilisation des particules et polluants par le ruissellement et l'érosion diffuse).

Ce modèle (figure 21) est fréquemment utilisé pour des thématiques de recherche telles que :

- (i) Etude de la dynamique de la structure de surface des sols cultivés.
- (ii) Influence de l'état structural sur le partage infiltration-ruissellement.
- (iii) Rôle de la rugosité de surface sur la détention et le ruissellement.
- (iv) Influence du couvert végétal et la redistribution de particules (terre, spores, pesticides).
- (v) Transfert de particules solides et de polluants à la surface du sol.
- (vi) Résistance mécanique de la surface des sols à l'incision par le ruissellement.



Figure 21. Vue du simulateur installé à l'INRA d'Orléans.

III.1.3. Mesures du transport solide

La quantification de l'érosion par les **mesures du transport solide** est une méthode qui permet d'évaluer la quantité de sol érodé et transporté par l'eau, ce qui est essentiel pour comprendre l'impact de l'érosion sur les écosystèmes, les infrastructures et l'agriculture. Cette approche mesure la quantité de particules solides (sédiments) qui sont déplacées par le ruissellement, la rivière ou les autres agents érosifs. Il existe plusieurs techniques pour mesurer ce transport solide, et chacune a ses avantages en fonction des contextes géographiques, des objectifs de l'étude et des ressources disponibles.

Transport en solution ou en suspension :

La mesure des transports en solution est une procédure relativement aisée. En effet, les concentrations en matières dissoutes sont, dans la plupart des cas, homogènes au sein d'une section de mesure. Par conséquent, une seule mesure ponctuelle suffit généralement à déterminer les concentrations recherchées. Néanmoins, pour des raisons de sécurité, il est préférable de procéder à trois mesures en des points différents. Ces concentrations sont liées à Résistivité R (inverse de la conductivité électrique). Une formule établie par Richard et N'Guyen présentent cette relation comme suit :

$$C = K / R$$

C : concentration en mg/l ; R : résistivité en ohms/cm.cm² à 25°C ; K coefficient

Tableau 3. Relation entre la concentration K et la résistivité R des eaux de ruissèlement.

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

III.1.4. Mesures par la sédimentation dans les retenues

La **quantification de l'érosion par mesures de la sédimentation dans les retenues** est une méthode utilisée pour évaluer l'impact de l'érosion hydrique sur les barrages et leurs réservoirs. 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.

✓ Le 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**.

Les mesures bathymétriques à l'échosondeur sont utilisées pour créer des **Modèles Numériques de Terrain (MNT)** avant et après la sédimentation. La différence entre ces modèles permet de calculer le volume de sédiments accumulés dans la retenue. Le volume total de sédiments piégés est déterminé par soustraction des deux MNT. Cela donne une idée sur la cinétique de l'alluvionnement et permet d'évaluer l'efficacité du barrage à piéger les sédiments, autrement dit la durée de vie du barrage.

Autres modèles pour la quantification du processus de sédimentation

D'autres outils peuvent être utilisés pour la recherche en matière d'érosion hydrique, tels que

- **les parcelles de ruissellement** : ce sont des parcelles pentues de 50 à 1000 m², équipées d'un pluviographe et, en aval, d'un canal de réception du ruissellement et des pertes en terre. Ce canal débouche sur un ou plusieurs bacs de sédimentation. Pour chaque pluie naturelle, on fait une observation du volume ruisselé et du poids de terre érodé.

Le coefficient de ruissellement de la pluie C, [$C = V_{(\text{volume ruisselé})} / (P_{(\text{pluie en m})} \times S_{(\text{surface (m}^2)})$]
 exemple : Supposons Surface de la parcelle expérimentale $S = 100 \text{ m}^2$; Pluie = 20 mm = 0,02 m ; Volume de ruissellement mesuré $V = 1,5 \text{ m}^3 \rightarrow C = 1,5 / (0,02 \times 100) = 0,75 (75\%)$; c'est-à-dire que (75 % de la pluie a ruisselé).

Cet équipement qui donne enregistrements pluviographiques et les caractéristiques de la pluie, est hélas lourd à installer, coûteux, environ dans les 60000 à 10 000 Euros.

- **les pièges à sédiments** : étude à l'échelle du bassin versant avec des pièges à sédiments en bas de pente (surtout utilisé par les hydrologues). - installation de "pieux-repères" en haut et en bas de pente: des mesures du niveau du sol avant et après la pluie permettent d'évaluer le détachement des particules sur le pieu amont et l'atterrissement sur le pieu aval. Cette méthode est assez approximative, on la dit "semi-quantitative".

III.2. Mesures indirectes

Les **méthodes indirectes de quantification de l'érosion des sols** sont des techniques qui permettent d'estimer la perte de sol sans avoir besoin de mesures directes sur le terrain. Ces méthodes se basent sur des modèles théoriques, des observations à distance ou des relations empiriques pour évaluer l'ampleur de l'érosion. Elles sont souvent utilisées lorsque l'accès aux zones affectées est difficile, ou lorsqu'il est nécessaire de couvrir de grandes étendues. Voici un aperçu des principales **méthodes indirectes** de quantification de l'érosion.

III.2.1. Modèles empiriques (exemple, les équations USLE et RUSLE)

Les modèles empiriques sont basés sur des observations statistiques et des équations développées à partir d'études sur le terrain. Ces modèles sont utilisés pour estimer la perte de sol en fonction de plusieurs facteurs environnementaux, tels que le climat, la topographie, la couverture végétale, etc. **USLE (Universal Soil Loss Equation)** : Il s'agit de l'une des méthodes les plus connues pour estimer la perte de sol due à l'érosion par l'eau. **L'USLE** peut être adaptée à différents contextes géographiques et de gestion des terres, bien que son utilisation soit limitée dans les zones à fortes pentes ou sous des conditions extrêmes.

Ces modèles fournissent **des estimations de la perte de sol** sur des périodes données et sur des zones géographiques étendues, mais ne prennent pas en compte les processus de transport des sédiments à grande échelle.

III.2.2. Télédétection et imagerie satellitaire

Les techniques de **télédétection** permettent de mesurer, observer et analyser les changements du paysage au fil du temps en utilisant des images satellites ou aériennes. Elles sont particulièrement utiles pour quantifier l'érosion sur de grandes zones.

- **Analyse des images satellites** : Les images satellites à haute résolution (comme celles fournies par Landsat, Sentinel, ou WorldView) permettent de suivre les changements dans la couverture du sol (par exemple, les pertes de végétation suite à un incendie), ce qui peut être un indicateur indirect de l'érosion. Les variations de la couleur des sols et de la végétation, en particulier dans les régions sensibles à l'érosion, peuvent signaler des zones où le sol a été transporté par le ruissellement.

- **Indices de végétation (NDVI)** : L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est une mesure couramment utilisée pour évaluer la santé de la végétation. En comparant les valeurs du NDVI au fil du temps, on peut déduire la stabilité du sol et identifier les zones où la végétation a disparu, souvent en raison de l'érosion responsable de la perte de fertilité.

- **Cartographie de la dégradation du sol** : À partir de données satellites, il est possible de créer des cartes de dégradation du sol, en combinant plusieurs indices (végétation, humus, topographie, etc.), qui permettent de repérer les zones les plus affectées par l'érosion.

III.2.3. Modélisation mathématique

Il ressort que les phénomènes d'érosion sont le résultat d'interactions complexes variables dans le temps et dans 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. Le but de cette partie n'est pas de dresser une liste exhaustive des démarches et modèles existants, mais plutôt de décrire les principales approches développées actuellement. 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 telles que les changements climatiques ou l'actions des activités humaines.

Equation universelle (modèle de WISCHMEIER)

Universal Soil Loss Equation (USLE)

De nombreux essais ont été conduits aux Etats-Unis par différents auteurs, dès 1932 sous la direction du service de la conservation du sol et du ministère de l'agriculture. En 1959, Wishmeier a finalement abouti à l'**'universal soil loss equation'** dues à l'érosion pluviale (pluies et ruissellement) puis en 1978 la Revised Universal Loss Soil Equation. Cette équation est utilisée aux Etats-Unis depuis cette date en agriculture. Son principe est de comparer l'érosion d'un site quelconque à l'érosion d'une parcelle témoin ayant une longueur de 22m et une pente de 9% sur jachère nue, c'est à dire labourée périodiquement de manière à ce qu'aucune végétation ne puisse s'y développer et telle que le sol ne puisse former une croûte superficielle. Ce modèle empirique établi à partir du traitement statistique des résultats de nombreuses mesures en parcelles expérimentales menées sur plus de 20 ans exprime les pertes en sol comme le produit de différents facteurs selon la formule :

$$A = R * K * L * S * C * P$$

A est la **perte de sol** due à l'érosion et constatée par unité de surface pendant une période de temps déterminée. **R** est appelé facteur pluie ou **indice d'érosivité** (rainfall factor). Il a été défini comme le produit de l'énergie de la pluie par son intensité maximum en 30 minutes. Il peut aussi être considéré comme l'indice moyen annuel d'érosion par la pluie.

K est appelé le facteur sol et caractérise l'**érodabilité** de ce sol (soil erodibility factor). Elle peut être définie comme la susceptibilité du sol à l'érosion et est établie par rapport à une parcelle standard, évaluée en tenant compte de la texture, de la teneur en matière organique, de la structure et de la perméabilité du sol sans tenir compte du couvert végétal et des pratiques culturales.

S.L : facteur **pente** et **déclivité** tient compte à la fois de la longueur de la pente (L) et de son inclinaison (S). Dans la pratique, ces deux facteurs de pentes, L et S sont combinés en un seul facteur topographique qui permet d'évaluer globalement l'influence de la pente sur la vitesse de l'érosion.

C : facteur de **couverture végétale** est défini dans l'USLE comme le rapport entre la perte de sol d'une parcelle cultivée dans des conditions définies et la perte de sol correspondante d'une parcelle cultivée en jachère nue continue. C'est une mesure de l'efficacité relative des systèmes de gestion des sols et des cultures dans la prévention ou la réduction de la perte de sol. La valeur du facteur C est conditionnée par plusieurs variables et leur interaction nécessite des renseignements sur la voûte de verdure (feuilles et branches qui interceptent les gouttes de pluie et dissipent une partie de leur force érosive), la couverture végétale (résidus de culture et

végétation vivante sur la surface du sol), la biomasse du sol (toute la matière végétale dans le sol; les résidus aident à améliorer l'écoulement de l'eau dans le sol et la capacité de rétention du sol) le travail du sol (type, période et fréquence de travail du sol ce qui influe sur la porosité, la rugosité de surface et la compaction du sol). Ce facteur varie de 1 sur sol nu à 1/1000^{ème} sous forêt, 1/100^{ème} sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10^{ème} sous cultures sarclées.

P le facteur des **pratiques de soutien** (ou pratiques culturales anti-érosives) est une mesure des effets des pratiques visant à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion. On y trouve la culture en pente transversale, la culture en courbes de niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses et l'aménagement de voies d'eau gazonnées. Il varie entre 1 sur sol nu sans aucun aménagement antiérosif à 1/10^{ème} lorsque sur une pente faible, on pratique le billonnage.

L'équation a été réactualisée et a été rendue plus accessible aux utilisateurs grâce notamment à des tableaux de données ainsi qu'à des graphes rendant son utilisation plus conviviale. Le poids des différents facteurs a été évalué à partir du traitement statistique d'un grand nombre de mesures réalisées sur un grand nombre d'années sur des parcelles standardisées de dimensions réduites.

Critiques envers l'USLE

Selon Auzet (1987), la principale critique à faire à cette équation est **qu'elle ne tient pas compte des interactions entre facteurs**. En effet, elle se présente sous la forme d'un produit et fait intervenir les facteurs par leur poids statistique sans tenir compte de leur liaison causale, négligeant alors des relations complexes. Or, dans les régions peu accidentées, à climat peu agressif, les relations entre les facteurs sont sans doute plus déterminantes que les facteurs eux-mêmes. Ainsi, la dégradation progressive du sol sous l'action de la pluie permet à des pluies de plus en plus faibles de provoquer la formation d'un ruissellement et l'érosion. L'équation ne prend en compte les interactions entre facteurs que de manière sommaire puisqu'elle les suppose linéaires.

En résumé, ce modèle présente un certain nombre de points faibles :

- inaptitude à estimer les pertes en terre sur une courte période (saison ou épisode pluvieux isolé) ;
- il considère les facteurs de l'érosion comme indépendants, alors qu'il existe des nombreuses interactions ;
- il ne s'applique qu'à l'érosion en nappe puisque la source d'énergie est la pluie. Il est peu adapté à l'érosion linéaire et l'érosion en masse.

III.2.4. Modèles physiques déterministes

Les limites de l'USLE n'ont pu être entièrement dépassées. Les études plus récentes sur les processus de l'érosion ont notamment mis en avant **la variabilité spatiale et temporelle des paramètres d'érodibilité**. Pour pouvoir prendre en compte cette variabilité, les recherches en modélisation se sont tournées vers une approche plus déterministe basée sur la description des processus physiques au travers de modèles mathématiques.

Les technologies de prédiction de l'érosion basées sur ces processus ne sont pas vraiment nouvelles. Les études de Horton (1938) et Ellison (1947), ont fourni les principaux fondements

de la modélisation dite « à base physique ». Cependant ces technologies n'ont émergé qu'après les années 1970, avec d'une part, le développement du calcul numérique et d'autre part, un intérêt croissant dans le suivi de la qualité des eaux de surface (Moore et Foster, 1990).

La modélisation à base physique décrit l'érosion au travers de représentations mathématiques des processus hydrologiques et érosifs fondamentaux. Les processus pris en compte sont le **détachement** par les gouttes de pluie et/ou par le ruissellement, le **transport** par les gouttes de pluie, le transport par le ruissellement, et le **dépôt** (sédimentation) par le ruissellement (Moore et Foster, 1990).

III.2.5. 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.

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.

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. 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. Dans ce dernier, on peut intégrer des paramètres des modèles

d'érosion comme l'USLE permettant ainsi de faire une modélisation spatialisée de l'érosion des sols et de la production des sédiments.

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. 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.

C'est une technique qui permet une estimation assez rapide de l'érosion et capable de prendre en compte les variations temporelles et spatiales à l'échelle du bassin-versant. L'étude des taux d'érosion à l'aide du césium-137 (^{137}Cs), bien développée depuis une vingtaine d'années, répond à ce genre de critères. Le césium-137 est un radioélément artificiel ($T_{1/2} = 30$ ans) introduit dans l'atmosphère par les essais nucléaires. Le ^{137}Cs est très fortement adsorbé sur les particules du sol et constitue ainsi un traceur de leur mouvement. En comparant la quantité de ^{137}Cs contenue dans des sols supposés stables avec celle de sols en érosion ou en accumulation, et à l'aide de modèles empiriques, on peut estimer la quantité de particules érodées ou accumulées durant les 40 dernières années.

Finalement, on ne peut terminer cette partie du cours sans insister sur le fait que :

- Le recours à l'une ou l'autre des méthodes est d'abord fixé par les ambitions du projet en termes d'objectifs scientifiques, d'échelle spatio-temporelle, des moyens techniques et financiers consentis.
- Les différentes méthodologies étudiées, qui ont chacune leurs domaines d'applications et leurs limites, apparaissent complémentaires. Le choix de l'une d'entre elles et/ou leur couplage doit être fait en fonction de la problématique et des objectifs de recherche

Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA)

L'étude de l'érosion des sols par les outils de l'IA, connaît un développement rapide ces dernières années. L'IA permet de modéliser, prédire et cartographier l'érosion en tenant compte de multiples paramètres complexes et spatialement variables. Modèles ML couramment utilisés sont : **Random Forest (RF)**, **Artificial Neural Networks (ANN)**, **K-Nearest Neighbors (KNN)**. Les Applications concrètes de l'IA dans l'érosion des sols : cartographie du risque d'érosion à l'échelle régionale ou nationale ; prévision de l'érosion en temps réel suite à des précipitations intenses ; évaluation de l'efficacité des mesures de conservation des sols ; détection automatique de zones critiques via drones ou satellites ; modélisation de l'érosion future sous changement climatique.

L'IA est devenue un outil essentiel pour étudier l'érosion des sols, en particulier pour : (i) modéliser des systèmes complexes ; (ii) prédire et cartographier l'érosion avec une grande précision ; (iii) réduire les coûts de mesure et améliorer la gestion des bassins versants.

Chapitre IV

Calculs des Pertes de l'Erosion Hydrique

Calculs des pertes de sol : Application de l'équation USLE

IV.1. Introduction

L'érosion des sols représente l'un des principaux défis environnementaux et agricoles de notre époque. Cette dégradation accélérée des sols a des conséquences dramatiques, notamment la perte de la fertilité des terres, la dégradation de la biodiversité et la pollution des cours d'eau.

Des stratégies telles que l'amélioration de la gestion de l'eau, l'augmentation de la couverture végétale, la modification des pratiques agricoles et l'aménagement du terrain peuvent transformer des zones vulnérables en espaces durables. La mise en œuvre de ces solutions passe par une approche intégrée qui combine la recherche scientifique, les innovations agricoles et les pratiques de gestion adaptées aux spécificités locales. Cette capacité à influencer sur les différents paramètres de l'érosion ouvre la voie à une gestion plus durable des sols, essentielle pour préserver notre environnement et assurer la sécurité alimentaire à long terme.

L'érosion hydrique affecte 28 % des terres de l'Algérie du Nord. Ce sont les terres à fortes pentes des massifs telliens qui sont les plus touchées. L'érosion se manifeste par la formation de rigoles et de ravines sur tout le versant avec affleurement de la roche-mère et une évolution en badlands. L'intensité de l'érosion hydrique varie d'une zone à l'autre. La partie Ouest, où l'érosion touche 47 % de l'ensemble des terres, est la région la plus érodée du pays ; viennent ensuite les régions du Centre (27%) et de l'Est (26%) (**Ministère de l'environnement et l'aménagement du territoire, 2000**). En général, l'érosion spécifique varie entre **2000 et 4000 t/km².an** (Demmak, 1982), L'Algérie est de ce fait l'un des pays les plus menacés dans le monde par l'érosion.

IV.2. Equation USLE:

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

L'équation **USLE** (Universal Soil Loss Equation) est utilisée pour estimer l'érosion des sols en fonction de plusieurs facteurs. Les principaux facteurs qui influencent l'érosion du sol selon l'USLE sont :

A est la **perte de sol** due à l'érosion et constatée par unité de surface pendant une période de temps déterminée.

R est appelé facteur pluie ou **indice d'érosivité** (rainfall factor). Il peut aussi être considéré comme l'indice moyen annuel d'érosion par la pluie.

K est appelé le facteur sol et caractérise **l'érodabilité** de ce sol (soil erodibility factor).

S.L Le facteur **pen**te et **déclivité** tient compte à la fois de la longueur de la pente (L) et de son inclinaison (S).

C Le facteur de **couverture végétale**, est une mesure de l'efficacité relative des systèmes de gestion des sols et des cultures dans la prévention ou la réduction de la perte de sol. Ce facteur varie de 1 sur sol nu à 1/1000^{ème} sous forêt, 1/100^{ème} sous prairies et plantes de couverture, 1 à 9/10^{ème} sous cultures sarclées.

P le facteur des **pratiques** culturelles anti-érosives) vise à évaluer les effets des pratiques visant à modifier le profil, la pente ou la direction de l'écoulement du ruissellement en surface et à réduire ainsi l'érosion. On y trouve la culture en pente transversale, la culture en courbes de

niveau, la culture en bandes alternées, l'aménagement de terrasses et l'aménagement de voies d'eau gazonnées.

Cas d'application de l'USLE

Calcul de l'index de l'érosivité des pluies R de WISHCMEIER :

L'estimation du facteur R selon la formule de Wischmeier & Smith (1978) nécessite la connaissance des énergies cinétiques (Ec) et de l'intensité moyenne sur 30 minutes (I30) des gouttes de pluie de chaque averse. Elles sont données par la formule empirique : $R = K.Ec.I30$.

1. Benachour M.M. 2016. Etude de l'érosivité des pluies sur le bassin de la Soummam par le biais de SIG et télédétection.

Les valeurs de R varient de 37 T/ha comme valeur minimale au niveau de la station de Tixter (sud-est du bassin), et une valeur maximale de 113.2 t/ha à Tifra à l'extrême nord du bassin, et une valeur moyenne de l'ensemble du bassin de 62 Tonne/ha.

Tableau 4. classification de l'agressivité des pluies

classe	Intervalle de R exprimé en Tonne/ha	Degré d'agressivité des pluies
1	36<R<50	Moyen
2	50<R<92	fort
3	92<R<113	Très fort

Le bassin de la Soummam est considéré comme l'un des bassins les plus menacés par l'érosivité des pluies en Algérie, vu que plus de 65% de sa surface présente un fort degré d'érosivité des pluies.

2. Mostephaoui, T. (2013). Cartographie des risques d'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol à l'aide d'un système d'information géographique dans le bassin versant d'el Hamel (Boussaâda) Algérie.

Le facteur climatique R : selon la formule de Roose (1977) permet de connaître la valeur annuelle de R lorsqu'on ne dispose que des précipitations. L'application de cette formule donne $R = 0,0295.P1$; pour $P1 = 206.06$ mm, la pluie moyenne annuelle.

Ceci donne un $R = 6,08$ t/ha/an, évaluant les pertes de sol à 6,08 tonnes par hectare et par année dans la région de Bousaada.

Tableau 5. Relevé des précipitations moyennes annuelles par station météorologique

station	P ann moy	log R	R t/ha
(0) tixter	230,07	3,61	36,97
(0) Mchedallah	295,54	3,85	46,77
(0) portes de fer	290,2	3,82	45,77
(0) sidi embarek	333,88	3,92	50,18
(0) el esnam sh	321,96	3,95	51,84
(0) bouira coligny	390,44	4,03	56,36
(0) bir kasdali	389,69	4,04	56,74
(0) ighil ali	382,45	4,04	57,04
(0) Khemis	409,48	4,10	60,27
(0) sidi yahia	394,84	4,12	61,82
(0) Sourelghou	431,19	4,16	64,33
(0) teniet enasr	465,42	4,23	68,77
(0) dne maouchi ahmed	483,28	4,32	75,51
(0) ain abessa	561,04	4,38	79,49
(0) tifra	748,1	4,73	113,20

3. KACI, M., HABI, M. et MORSLI, B. (2017) Estimation de l'érosion hydrique par l'application de l'équation universelle de pertes en sol (USLE). Cas du bassin versant non jaugé de l'oued Rhiou, (Bassin de Cheliff) Algérie. *Geo-Eco-Trop.*, 2017,41,3:503-518.

$R = 0,5 P$ où les précipitations sont exprimées en mm.

Ce travail a pour objectif de proposer une méthode de cartographie des zones à risques d'érosion par SIG en utilisant le modèle USLE (Universal Soil Loss Equation) de Wischmeier et Smith (1958, 1978). Les observations ont permis de dresser une carte de localisation des zones exposées aux plus forts risques d'érosion, dont les moyennes de pertes de sol sont estimées à 25,26 t/ha/an. Ceci représente, à l'échelle du bassin, une contribution de 806 975 t/an de sédiments au barrage de Gargar (oued Rhiou). L'analyse statistique des données montre que 87 % du bassin versant présentent une sensibilité faible à modérée à l'érosion, tandis que 4,75 % présentent une sensibilité très élevée à l'érosion, dépassant 33,6 t/ha/an.

Les valeurs résultent de l'application de la formule suivante : $R = 0,5 P$ où les précipitations sont exprimées en mm. Les données pluviométriques utilisées sont issues de l'interpolation spatiale (KERNEL interpolation sous Arc Gis 10) de données climatiques mensuelles moyennes sur 35 ans (1979-2014) de 15 stations météorologiques.

Le Facteur K

K, exprime l'érodibilité du sol ou bien une perte de terre moyenne en tonnes/acre par unité de superficie, d'une parcelle laissée en jachère, d'une longueur de 72,6 pi (22.13m) et 9 % d'inclinaison. Sur le terrain, K traduit la vulnérabilité des particules du sol au détachement et transport. Ceci implique que la valeur de K est directement lié à la texture, mais la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité du sol ont aussi un rôle à jouer (tableau 6).

Tableau 6. Valeur de K en fonction de la texture et de la teneur en matière organique du sol.

Valeurs Moyennes de K
K = 0.02 _ sol sableux
K = 0.43 _ sol à sables très fins
K = 0.22 _ sol argileux

K : érodibilité du sol, traduit la vulnérabilité sol au détachement.

Classe texturale	Teneur en matière organique		
	Moyenne	Moins de 2 %	Plus de 2 %
Argile	0,22	0,24	0,21
Loam argileux	0,30	0,33	0,28
Loam sableux grossier	0,07	—	0,07
Sable fin	0,08	0,09	0,06
Loam sableux fin	0,18	0,22	0,17
Argile lourde	0,17	0,19	0,15
Loam	0,30	0,34	0,26
Sable fin loameux	0,11	0,15	0,09
Sable loameux	0,04	0,05	0,04
Sable très fin loameux	0,39	0,44	0,25
Sable	0,02	0,03	0,01
Terre franche argileuse	0,20	—	0,20
Loam sableux	0,13	0,14	0,12
Loam limoneux	0,38	0,41	0,37
Argile limoneuse	0,26	0,27	0,26
Loam limono-argileux	0,32	0,35	0,30
Sable très fin	0,43	0,46	0,37
Loam sableux très fin	0,35	0,41	0,33

Dans le bassin de Cheliff, Kaci et al., (2017) estiment le facteur K_{USLE} à des valeurs allant de 0,11 à 0,46 pour différents états texturaux des sols (tableau 6). D'autres parts, Aribi et Roose (2004) donne des valeurs de K_{USLE} allant de 0,002 à 0,02 pour des sols de la région de Midéa

très résistants à la battance des pluies Riches en argile, saturée en calcium et protégés par un mulch en cailloux.

Tableau 7. Variation de K en fonction de la texture du sol sur le bassin versant de Oued Rhiou (d'après Kaci et al., 2017)

Sol	Texture	Facteur K (t/ha)
Sols bruns calcaires	LAS	0,22
Sols fersiallitiques	LAS	0,46
Vertisols	AL	0,36
Sols minéraux bruts d'érosion	SL	0,11
Colluvions	AL	0,27

LAS : texture limono-argilo-sableuse. AL : texture argilo-limoneuse. SL : texture sablo-limoneuse. La texture a été déterminée à l'aide du triangle USDA.

Facteur LS

Ce facteur montre l'importance de l'inclinaison et de la longueur de pente dans les processus de l'érosion en nappe et en rigole. Les valeurs les plus faibles, entre 0 et 5, du facteur topographique sont attribuées aux zones de plaines (lit du cours d'Oued), à l'inverse, les valeurs plus élevées de LS, supérieures à 5, sont associées aux versants les plus abrupts des affluents (Kaci et al., 2017).

$$LS = [0,065 + 0,0456(\text{pente}) + 0,006541(\text{pente})^2] \left(\frac{\text{longueur_pente}}{\text{const}} \right)^{NN}$$

Où :				
	○	Pente = inclinaison de la pente (%).		
	○	Longueur _pente = longueur de la pente (pi)		
	○	const = 72,5 en mesures impériales ou 22,1 en mesures métriques		
	○	NN = voir le tableau ci-contre		
<u>Pente</u>	<u><1</u>	<u>1 ≤ Pente < 3</u>	<u>3 ≤ Pente < 5</u>	<u>≥ 5</u>
NN	0,2	0,3	0,4	0,5

Exemple de calcul

Application de la formule pour une parcelle d'une longueur de la pente de **31** m et une pente de 10% ; donnant un facteur LS= 1,3800

$$LS = [0,065 + 0,0456(\mathbf{10}) + 0,006541(\mathbf{10})^2] \left(\frac{\mathbf{31} - \mathbf{10}}{\mathbf{72,5}} \right)^{\mathbf{0,5}}$$

- Pour une longueur de la pente de **31** m et une pente de 1 % donc LS = 0,1290
- Pour une longueur de la pente de **488** m et une pente de 5% donc LS= 2,1446
- Pour une longueur de la pente de **488** m et une pente de 10% donc LS= 5,5203

Facteur C :

Correspond au facteur de culture (végétation), c'est l'expression du degré de couverture. En pratique on détermine la valeur de C, en multipliant le coefficient « facteur de culture » par « facteur méthode de travail du sol »

Tableau 8. Valeurs du facteur C

Facteur type de culture		Facteur méthode de travail du sol	
Type de culture	Facteur	Méthode de travail du sol	Facteur
Maïs-grain	0,40	Labour d'automne	1,0
Haricots, canola, maïs d'ensilage	0,50	Labour de printemps	0,90
Céréales (de printemps et d'automne)	0,35	Déchaumage	0,60
Cultures horticoles saisonnières	0,50	Travail du sol sur billon	0,35
Arbres fruitiers	0,10	Travail du sol en bandes	0,25
Foin et pâturage	0,02	Semis direct	0,25

Pour générer ce facteur, Kaci et al., (2017) avait utilisé la droite de régression trouvée à l'aide du module « Spatial Analysis » d'ArcGIS 10.0. Pour le bassin d'Oued Rhiou, les observations étaient établies :

Les zones avec des sols nus ou en jachère (majeure partie du bassin), le facteur *C* est supérieur à 0,8. Les zones cultivées associées aux grandes cultures céréalières et fourragères, le facteur C varie 0,6 à 0,7. Les zones de massifs forestiers et de formations de maquis/garrigue, le facteur C a des valeurs inférieures à 0,6.

Tableau 9. Valeurs du facteur C en fonction du type de l'occupation du sol

Type d'occupation du sol	Facteur C
Sol nu	> 0,8
Mosaïque de cultures	0,6 - 0,7
Forêt	< 0,6

Le facteur P ; correspond au facteur de pratique de conservation. Il reflète les effets des pratiques sur les quantités d'eaux de ruissellement et la vitesse du ruissellement. P exprime le ratio des pertes de terre associées à une pratique agricole. Le facteur P prend en compte les pratiques culturales mises en œuvre et évalue leur apport pour la conservation du sol en fonction des paramètres relatifs à la diminution du ruissellement et l'érosion, telles que le labour en courbes de niveau, dans le sens de la pente ou perpendiculairement à la pente.

Tableau 10. Valeurs du facteur P

Pratique de conservation	Facteur P
Culture dans le sens de la pente	1,0
Culture à contre-pente	0,75
Culture suivant les courbes de niveau	0,50
Culture en bandes, à contre-pente	0,37
Culture en bandes, suivant les courbes de niveau	0.25

Tableau 11. Valeurs Seuils de pertes

Classe de risque d'érosion du sol	Perte de terre possible (tonnes/acre/année)
Très faible (tolérable)	< 3
Faible	3 – 5
Modéré	5 – 10
Élevé	10 – 15
Grave	> 15

Exemple de Stratégie de gestion avec objectif de réduire les pertes de sol

L'équation USLE (Universal Soil Loss Equation), qui permet d'évaluer la perte de sol, révèle qu'il existe plusieurs leviers d'action permettant de limiter cette érosion. En effet, les cinq facteurs clés de l'USLE l'érosivité des pluies, l'érodibilité du sol, la pente et la longueur du terrain, la couverture végétale et les pratiques de gestion, sont autant d'éléments susceptibles d'être modifiés ou optimisés.

Ainsi, il est possible d'agir sur chaque facteur pour réduire les risques d'érosion et restaurer la qualité du sol. Des stratégies telles que l'amélioration de la gestion de l'eau, l'augmentation de la couverture végétale, la modification des pratiques agricoles et l'aménagement du terrain peuvent transformer des zones vulnérables en espaces durables.

En optimisant les facteurs, composant l'équation USLE on peut réduire considérablement l'érosion du sol et améliorer la qualité des terres agricoles ou forestières.

- **R** : Minimiser les effets de l'érosion liée aux pluies en améliorant la gestion de l'eau et du drainage, par la mise en place d'ouvrage canalisant le ruissellement, augmentant l'infiltration et le stockage.
- **K** : Améliorer la structure du sol par la gestion de la matière organique et limiter les pratiques destructrices.
- **LS** : Réduire la pente et la longueur des versants, installer des structures de contrôle comme des terrasses.
- **C** : Augmenter la couverture végétale et adopter des pratiques agricoles respectueuses de la structure du sol.

- **P** : Mettre en œuvre des pratiques de gestion pour contrôler l'écoulement et protéger le sol.

Tableau 12. Exemple de pratiques à promouvoir pour une réduction des pertes de sols.

Facteur	Stratégies de gestion	Exemple
R	Le facteur R pour un champ ne peut être modifié.	–
K	Le facteur K pour un champ ne peut être modifié.	–
LS	L'aménagement de terrasses permet de réduire la longueur de la pente et du même coup les pertes de terre.	L'aménagement de terrasses exige un investissement supplémentaire et perturbe quelque peu les activités de la ferme. Envisager d'abord la possibilité de recourir à d'autres pratiques de conservation du sol.
C	Le choix de types de culture et de méthodes de travail du sol qui abaissent la valeur du facteur C amène une réduction de l'érosion.	Envisager les systèmes culturaux qui offrent une protection maximale des sols. Recourir le plus souvent possible aux systèmes de travail réduit du sol.
P	Le choix d'une pratique de conservation à laquelle est associé le facteur P le plus faible possible amène une réduction des pertes de terre.	Utiliser des pratiques de conservation, comme la culture à contre-pente, qui font en sorte que les sédiments se déposent près de leur source.

Exemple de calcul de A pour une zone dont les caractéristiques sont :

La zone d'étude présente un R= 100.

Le sol est constitué d'un limon sableux fin ayant une teneur en matière organique de 1,5%.

Le terrain a une longueur et d'inclinaison de la pente (LS) de 800 (244m) pieds de long et possède une pente de 6 %.

Le champ-échantillon a été labouré au printemps, puis ensemencé de maïs-grain.

Élément type de culture pour le maïs-grain = 0,4

Élément méthode de travail du sol pour un labour de printemps = 0,9

Le champ-échantillon est cultivé à contre-pente.

Selon les données déduites des tableaux précédents

On trouve le facteur K = 0,09.; Facteur C = 0,4 x 0,9 = 0,36. Facteur LS = 1,9170 ; On obtient le facteur P = 0,75

$$A = R \times K \times LS \times C \times P = 100 \times 0.09 \times 1.91 \times 0.36 \times 0.75 = 4.6413 \text{ t/acre/an}$$

$$A = 4.6413 \times 2.24 = 10.4 \text{ t/ha/an}$$

Chapitre V

Moyens et Méthodes de Protection des sols

Moyens et Méthodes de Protection contre l'érosion**V.1. Introduction**

Les situations d'érosion des sols, résultent en général de la conjonction de 3 séries de critères:

- des critères géomorphologiques : substrats géologiques tendres (craie, sables tertiaires, ...) à relief ondulé avec des pentes à la fois faibles et longues favorable à la mécanisation ou à l'agrandissement des parcelles.
- des critères portant sur les propriétés hydrologiques de surface de la couverture pédologique.
- des critères liés à l'utilisation agricole des terres, remembrement des parcelles et régression des prairies, des zones où prédominent des systèmes de production à base de céréales et cultures industrielles ou d'élevage intensif.

En zones méditerranéenne, Les conditions climatiques, topographiques et d'occupation des sols rendent compte de la gravité des phénomènes d'érosion hydrique, dans les parcelles de vignobles, de vergers ou même des cultures annuelles, implantés sur de fortes pentes. De telles conditions nécessitent des moyens technologiques de prédiction de perte en terre et de lutte contre l'érosion.

Les préjudices se manifestent par l'apparition régulière de rigoles ou ravines, principalement localisées dans des thalwegs (zones naturelles de circulations préférentielles des eaux excédentaires) ou créées à la faveur des empreintes laissées en surface par les passages d'engins agricoles. Ceci engendre des obstacles aux opérations culturales et des préjudices éventuels en aval plus nuisibles que les pertes en terre proprement dites. Deux processus essentiels jouent un rôle important dans l'apparition des signes d'érosion : l'excès d'eau à la surface du sol et la concentration du ruissellement. L'importance ou l'étendue des dégâts est fonction de la qualité des événements climatiques et des paramètres de résistance à l'érosion.

V.2. Aspects généraux des mesures à la parcelle

Ce sont des mesures qui assurent la cohérence hydraulique des aménagements à l'échelle des bassins versants et cohabitent efficacement avec les pratiques agricoles. La nature de ces aménagements est fonction des cultures pratiquées.

Pour limiter efficacement l'érosion des sols dans une région agricole des principes généraux doivent être adoptés.

- Identification des différentes zones selon la sensibilité à l'érosion hydrique.
- Protéger le sol de l'impact de la pluie.
- Retarder et réduire la formation d'un écoulement superficiel.
- Réduire les capacités de détachements des particules.
- Réduire le transport du ruissellement en limitant sa vitesse et sa concentration.
- Intégration des actions dans un programme de lutte globale contre l'érosion.

Les mesures individuelles obéissent à deux aspects essentiels

- L'aspect agronomique (préventif) en priorité, qui englobe les techniques culturales puisque toute modification de la structure du sol entraîne une variation de sa stabilité dans le temps et de son comportement hydraulique vis à vis des précipitations.
- L'aspect hydraulique (curatif) : aménagements divers. Les moyens de lutte doivent se situer dans deux zones bien distinctes : - une zone émettrice de ruissellement, - une zone sensible accumulant les précipitations.

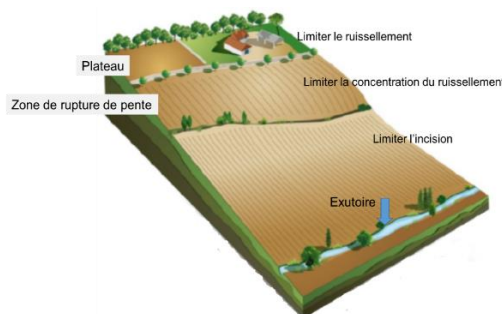


Figure 22. Représentation des rôles des différentes zones hydrauliques

V.3. Les mesures agronomiques

V.3.1. Diminuer l'impact des gouttes de pluie (Objectif 1)

V3.1.1. La simplification du travail du sol : le non labour (moyen 1)

La suppression du labour peut permettre dans certains cas de limiter l'impact des gouttes de pluie et de réduire très nettement le ruissellement. La persistance de résidus végétaux en surface protège très bien la surface du sol (**effet de mulch**). Cette pratique entraîne également la persistance du profil du sol de zones continues, plus ou moins profondes, ce qui augmente la résistance du sol vis-à-vis de l'incision des couches superficielles.

« Le labour coupe l'aspect continu du profil du sol »

Cependant, cette pratique présente deux effets opposés selon sa position géographique,

- sur le plateau (impluvium) ou
- sur les zones de rupture de pente (zone de concentration du ruissellement).

La quantité totale d'eau ruisselés est parfois plus élevée en zone non travail en raison d'une plus faible rugosité de surface qui entraîne une plus faible rétention superficielle. Le non enfouissement des résidus de récolte empêche également la restitution de la matière organique dans le profil du sol.

Le **non labour**, enfin, ne permet pas la suppression des traces de roues (parfois nombreuses sur les parcelles de betteraves, maïs, pomme de terre, récoltées souvent dans de mauvaises conditions), ceci favorise le démarrage rapide du ruissellement.

Pour conclure, la suppression du labour semble très efficace aujourd'hui contre l'érosion hydrique de type (Rigoles ou Griffes) rill-interrill (rigoles parallèles et peu espacées) ; elle semble l'être un peu moins dans un contexte où prévaut l'érosion par ruissellement concentré (rigoles et ravines très espacées). Pour la bonne application de cette méthode, il faut donc tenir compte de l'existence au sein d'un bassin versant de sous unités spatiales ayant des rôles différents vis-à-vis de l'hydrologie de surface et de l'érosion.

V.3.1.2. Le paillage et le non déchaumage (moyen 2)

Le paillage permet de lutter efficacement contre l'impact des gouttes de pluie (effet splash). Il constitue un rideau protecteur et crée une rugosité de surface qui divise et ralentit la lame d'eau de ruissellement, les pertes en terre sont ainsi considérablement réduites.

Tableau 13. Effet du paillage sur le ruissellement et les pertes en terre (D'après Mannering, 1960 in Derancourt, 1995)

	Tonne/ha de résidus	
	0	2,5
Ruissellement: hauteur total (mm)	84	51
Concentration en terre (g/l)	38	7
Perte en terre (Tonne/ha)	33	4

Ce paillage peut être naturel ou artificiel (pailles de blé broyées). Il peut être mis en œuvre par la technique du non déchaumage. Pendant l'inter-culture, il peut s'écouler une longue période durant laquelle le sol reste parfois sans protection (par exemple entre une culture de blé récoltée en août et une culture de maïs semée en avril-mai).

Le non déchaumage consiste alors à laisser le chantier de récolte en l'état et reporter le labour au printemps. Il permet de maintenir un effet de "mulch" (couverture végétale morte) qui diminue fortement l'impact des précipitations, le sol n'étant pas travaillé, il reste résistant aux incisions. Pour les récoltes de fin de printemps il permet entre autre de garder l'humidité du sol pour la restituer en été.

Des mesures sous pluies simulées ont montré que (figure 23)

- le taux de couverture doit dépasser 30 % pour réduire de façon significative, la concentration des eaux de ruissellement.
- De plus, à partir de 50 % de couvert, la baisse du coefficient de ruissellement devient intéressante puisqu'elle est au moins divisée par deux.

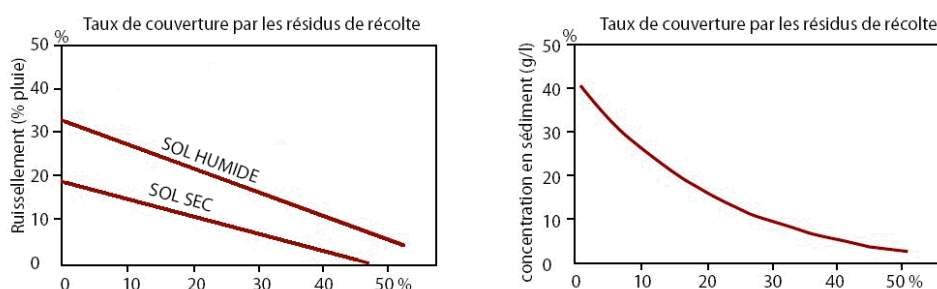


Figure 23. Rôle de la couverture dans la réduction de la quantité et de la charge des eaux de ruissellement (modifié d'après une étude INRA).

V.3.1.3. Les cultures intermédiaires (moyen 3)

Les cultures intermédiaires sont implantées après les cultures principales et permettent d'assurer une protection des sols dénudés. Outre le fait de diminuer l'impact des gouttes de pluies, le couvert végétal constitue un excellent piège à nitrate.

Deux types de cultures intermédiaires peuvent être utilisés :

- les cultures destinées à être récoltées, puis vendues ou autoconsommées, par exemple seigle, radis.
- les engrais verts destinés à être enfouis pour améliorer les propriétés physiques du sol (meilleure stabilité structurale); exemple: moutarde, vesce, ray-grass d'Italie RGI),

L'intérêt des semis d'engrais vert est multiple :

- Hydraulique (limite le ruissellement en protégeant le sol de la battance et piège les sédiments dans la parcelle)
- Agronomique (améliorent la structure du sol pendant la végétation, augmente sa résistance à l'érosion grâce à l'enracinement, facilite la décomposition des pailles)

Des mesures sous simulation de pluies ont permis de démontrer l'intérêt d'une telle pratique.

Le sol nu restitue la quasi-totalité de l'eau reçue (les courbes de la pluie et du sol nu sont presque parallèles). En sol couvert, on constate un retard important (environ 30 mn) de la mise en œuvre du ruissellement, mais aussi une infiltration non négligeable qui se poursuit par la suite.

Le couvert végétal permet également de piéger les sédiments dans la parcelle. Certaines mesures sous simulation de pluies ont permis de démontrer qu'un couvert végétal diminuait de 10 à 100 fois la concentration en matières en suspension dans le ruissellement. En termes de perte de terre, sur les parcelles expérimentales, cela représente des pertes comprises entre **6 à 10 t/ha** sur sol nu et moins de **1,1 t/ha** sur sol couvert.

Les engrais verts présentent donc des avantages multiples:

- ils contribuent au maintien des sols au niveau des ruptures de pente ou des zones de concentration, à condition de choisir des variétés à système racinaire puissant
- ils améliorent la décomposition des résidus de récolte en favorisant l'activité microbienne et biologique du sol

V.3.2. Augmenter la capacité d'infiltration (objectif 2)

Pour favoriser l'infiltration, il faut maintenir le sol poreux en surface et créer des obstacles ou des barrages au ruissellement.

V.3.2.1. Le travail du sol (moyen 1)

Les différentes façons culturales induisent des états de surface qui conditionnent la rugosité du sol, son système de porosité et l'état de tassement. Le travail du sol intervient donc à la fois sur le stockage de l'eau en surface et le régime d'infiltration. L'influence des opérations techniques sur la formation et le volume du ruissellement mérite la plus grande attention.

V.3.2.1.1. La préparation des lits de semences (moyen 1.1)

Conserver un maximum de rugosité à la surface du sol permet de retarder et limiter l'apparition du ruissellement. Un sol très motteux peut réduire le ruissellement de 50 à 75 % par rapport à un sol nu. Il y a lieu d'arbitrer entre la nécessité d'avoir un affinement suffisant pour assurer une bonne levée et pas trop poussée pour limiter la vitesse d'apparition du ruissellement.

Si les pluies risquent de survenir rapidement après les semis (cas de semis précoces), un travail grossier permet de limiter le ruissellement. Il a peu d'inconvénients sur le plan agronomique car la pluie favorisera une bonne humectation malgré un contact terre-graine médiocre ou insuffisant.

Par contre, plus la probabilité de temps sec après le semis est forte, plus il faut affiner la ligne de semis. Une telle appréciation prêche surtout pour **une bonne connaissance des risques** locaux et un arbitrage en conséquence.

V.3.2.1.2. Le binage (moyen 1.2)

Cette opération a pour principal objectif de lutter contre les adventices. Elle permet de briser la croûte de battance et de restituer ainsi une certaine capacité d'infiltration au sol. Mais en même temps, le binage ameublisse le sol et facilite ainsi l'entraînement des particules par le ruissellement. Le binage est à proscrire ou à envisager avec beaucoup de prudence dans les zones sensibles à l'incision.

V.3.2.1.3. Le sens du travail du sol (moyen 1.3)

Un travail en travers de la pente peut, dans une certaine mesure :

- retarder l'apparition du ruissellement en augmentant la rugosité dans le sens de la plus grande pente
- ralentir l'écoulement en diminuant la pente de son lit.

Sur pente forte, il peut se poser des problèmes de réglage des outils et de stabilité des engins agricoles.

Sur les pentes intermédiaires, l'efficacité du travail du sol perpendiculaire à la pente doit être appréciée en fonction des risques de rupture du « réservoir » créé par les lignes de travail du sol.

Un labour à la charrue de sols riches en argile (> 20 %), effectué perpendiculairement à la pente moyenne de la parcelle, permet de faire face à des pluies de 20 à 25 mm tombant en une à deux heures.

V.3.2.1.4. Les travaux du sol après récolte (moyen 1.4)

On suggère en général d'effectuer un travail du sol le plus tôt possible après les récoltes pour redonner au sol une capacité d'infiltration. Les choix et les modes d'utilisation des outils sont importants pour fragmenter la surface et créer un modelé rugueux. L'emploi des déchaumeuses à soc permet d'obtenir une surface de sol rugueuse et hétérogène, ce qui permet un stockage efficace des excès d'eau. Par contre, les outils à dents ou à disques ne permettent pas d'obtenir un stockage aussi efficace mais maintiennent d'avantage de résidus en surface. Les chantiers de récolte et particulièrement ceux qui laissent beaucoup d'empreintes de roues, sont à traiter en priorité lorsque les risques de dégâts dus au ruissellement sont importants.

V.3.2.1.5. Le décompactage ou sous-solage (moyen 1.5)

Pour lutter contre le processus de compactage du sol en profondeur, on peut utiliser une sous-soleuse. Le passage d'une dent à 60 cm de profondeur permet en effet de faire éclater l'horizon

compacté créant ainsi une zone de fissuration et d'infiltration. L'apparition du ruissellement est retardée, le temps de ressuyage du sol diminue. Cependant, la technique du sous-solage n'est pas adaptée à tous les types de sol, certaines expériences ont montré par exemple, que **cette méthode ne convenait pas aux sols limono-sableux**. La sous-soleuse ne détruit pas entièrement la zone compacte, ses effets de trop courte durée (un an après le décompactage, l'effet de la sous-soleuse est complètement estompée.

V.3.2.2. L'entretien humique et calcique des sols (moyen2)

L'ensemble des éléments qui peuvent améliorer la stabilité structurale des sols sont susceptibles 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. Les sources de matières organiques peuvent être variées.

V.3.2.3. La rotation des cultures (moyen 3)

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

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

V.3.2.4. Parcelle et assolement (moyen 4)

La taille et la répartition des parcelles, leur affectation 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.

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. Eviter les pentes longues, en une seule unité hydraulique.

V.3.3. Réduire la capacité d'incision et de transport (objectif 3)

V.3.3.1. Limiter le tassement et les empreintes de roues (moyen 1)

Le tassement du sol par les engins agricoles est un facteur défavorable ;

- à faible profondeur, il constitue un obstacle au drainage interne et favorise l'apparition d'un excès d'eau.
- en surface, dans les traces non effacées, une infiltration réduite favorise la formation de croûtes sédimentaires. Les risques de ruissellement augmentent fortement avec le pourcentage de surface tassée et le degré de tassement.

V.3.3.2. Compacter les talwegs (moyen 2)

Les eaux de ruissellement produites sur une parcelle ont tendance à se concentrer dans les dépressions (talwegs...). Les incisions apparaissent très rapidement dans ces zones fragilisées. Pour lutter contre ce processus, il faut essayer de consolider les zones de concentration du ruissellement, par tassement de talweg.

V.4. Mesures Hydrauliques (Curatives)

Les mesures agronomiques donnent des résultats appréciables, mais souvent insuffisants. La question de la maîtrise du ruissellement déjà formé demeure. Elle relève d'un traitement hydraulique. L'objectif des mesures hydrauliques est de maintenir le sol en place et contenir le ruissellement à l'échelle d'un paysage restauré dans ses fonctions hydrauliques régulatrices. Sur l'étendue d'un bassin versant affecté par du ruissellement et du ravinement, il s'agit de s'assurer de la maîtrise du réseau hydraulique de surface.

V.4.1. Limiter la concentration du ruissellement (Objectif 1)

Différents ouvrages existent pour retenir l'eau, au moins temporairement, dès l'amont du bassin versant, de manière à limiter les débits de pointe, éviter l'incision des zones de concentration et le cas échéant, provoquer la sédimentation des matières solides. Dans chacun des cas, la mise en place des ouvrages est décidée à la suite de dégâts subis par des zones situées en aval des bassins versants. Elle suppose une coopération entre agriculteurs et les services administratifs. « C'est protection décidée en amont pour sauvegarder l'aval »

V.4.1.1. Les plis (moyen 1)

La technique s'inspire de celles des banquettes, dont l'objectif est surtout de diminuer les longueurs de ruissellement en créant des obstacles. Les plis de faibles dimensions (hauteur utile : 10 à 60 cm) sont mis en place à l'intérieur des parcelles et peuvent être cultivés.

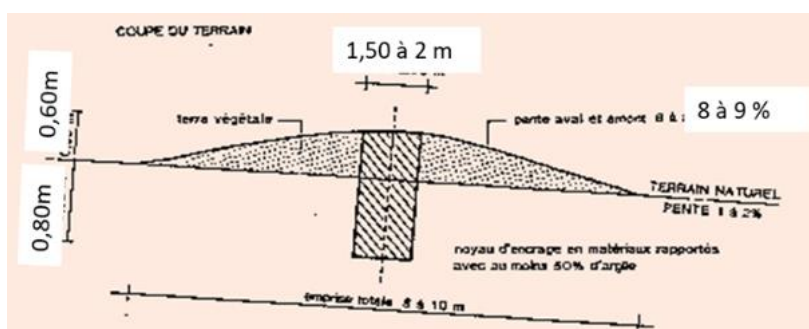


Figure 24. Croquet d'un pli.

V.4.1.2. Les diguettes (moyen 2)

Elles sont mises en place aux limites de cultures et d'exploitation ou sur les chemins d'exploitations. Deux types d'ouvrages. Les diguettes en matériaux rapportés (découverts de carrières de silice) sont destinées à assurer aux ouvrages une bonne stabilité. En outre, le fait qu'il s'agisse de matériaux différents du sol de la parcelle évite qu'elles ne soient rapidement détruites et augmente ainsi leur durée de vie.

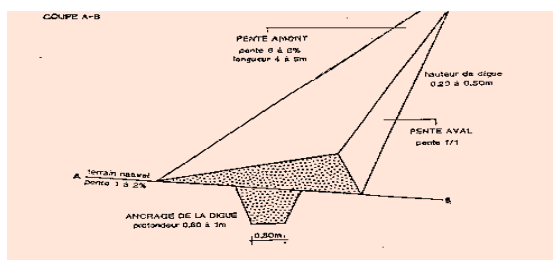


Figure 25. Diguette en paille en travers de talweg

Les autres diguettes sont composées de **balles de paille** de moyenne densité, ancrées dans le sol par un pieu et reliées entre elles. Les balles doivent être renouvelées tous les ans et réimplantées sur la zone de dépôt de limon de l'année précédente. Ce système léger a également des vertus démonstratives qui peuvent convaincre de l'intérêt de créer ce type de petites retenues. Après une pluie, l'eau stockée est facilement vidangée en relevant l'une des balles de paille.

V.4.1.3. Les mares (moyen 3)

Leur principale vocation était d'abreuver les animaux. Avec l'apparition des citernes, il y a eu de nombreuses suppressions. Cependant, quelques-unes sont maintenant créées avec la fonction de stockage des eaux ruisselées pour protéger l'aval des fortes concentrations.

La surface des mares est de quelques centaines de m² et leur profondeur est limitée : Leur capacité de stockage est donc de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de m³. Elles permettent de stocker une partie du ruissellement très en amont en fonction de la surface et de la nature de leurs impluviums de manière à éviter les débordements.

V.4.1.4. Les retenues collinaires (moyen 4)

Ces retenues sont créées dans certaines régions pour stocker l'eau afin de faciliter l'irrigation. Comme les mares, elles stockent l'eau et les sédiments, surtout si elles sont bien disséminées dans l'espace. La sédimentation compromet leur objectif premier, et compte tenu des masses de sédiments qui peuvent être arrachés à la surface des versants en un seul orage dans ces régions, elles peuvent occasionnellement se combler brutalement.

V.4.1.5. Les talus (moyen 5)

Ils ont d'abord un effet sur la topographie, puisqu'ils réduisent les pentes des terres cultivées situées en amont. Ils freinent l'écoulement de l'eau, diminuant ainsi sa capacité de transport et provoquent la sédimentation d'une partie des matières solides. En réduisant la vitesse, ils allongent les temps de circulation, permettant ainsi à une partie de l'eau de s'infiltrer. Les Talus peuvent correspondre à des affleurements du sous-sol, à une accumulation de la terre transportée par le travail du sol et par le ruissellement et / ou à des anciennes limites.

V.4.1.6. Les haies (moyen 6)

Favorise l'infiltration du fait de son système racinaire. La végétation buissonnante permet en outre d'armer le talus. Mais les haies présentent également d'autres avantages : brise-vent, refuge biologique, aspect esthétique, production de bois. Talus et haies peuvent constituer des éléments du réseau hydraulique : le choix de les conserver ou non peut reposer sur l'appréciation de leurs fonctions

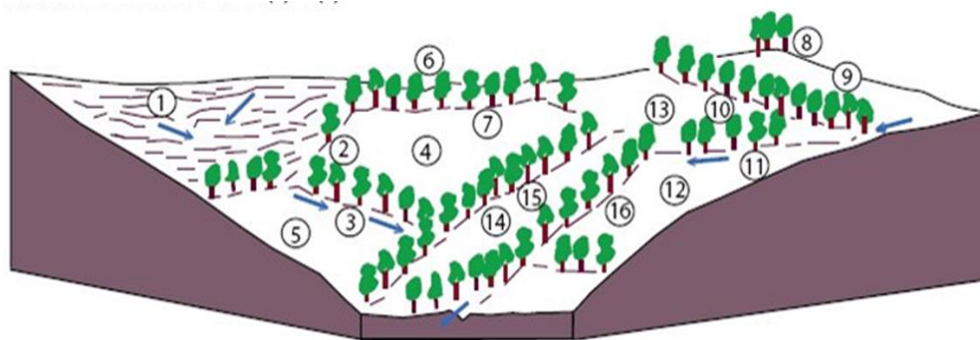


Figure 26. Exemple d'organisation et de fonctionnement des unités hydrauliques

Unité fonctionnelle A : comprend les éléments de 1 à 5 ;

1 : parcelle recevant l'eau de la pluie et éventuellement des parcelles en amont. 2 : talus dans la pente arrêtant les particules érodées et l'eau de ruissellement ; 3 : talus avec fossé dans l'axe colluvial drainant cette eau et celle de 4 et 5.

Unité B, comprend l'unité A et les parcelles 6 et 7. La parcelle 7 est sous de talus d'un rôle équivalent à 2.

Unité C, comprend les parcelles de 9 à 13. 10 : talus en limite de plateau empêchant le ruissellement sur le versant. 11 : axe colluvial ; 8 : située à la limite, son rôle hydraulique peu significatif.

V.4.1.7. Les chemins ou les routes en travers de la pente ou d'un axe de concentration

Lorsque les gradients de pente sont faibles (2 à 3 %), il est fréquent que les chemins et les routes en travers de la pente soient au moins localement en remblai, créant ainsi des zones de stagnation d'eau et de dépôts des matières solides à la base des parcelles, pouvant atteindre quelques ares à quelques hectares, suivant la taille de l'impluvium en amont et les états de surface du sol. Ce barrage peut être assez positif, s'il n'y a pas de déversement ponctuel provoquant le ravinement des parcelles en aval.

Lorsque les gradients de pente sont plus forts et les remblais plus importants, l'accumulation d'eau en amont des routes ou des chemins puis son infiltration dans le remblai, là où elles recoupent des petites dépressions peut provoquer des glissements détruisant la chaussée ou le chemin. Dans ce cas, on suggère d'implanter en amont un fossé de diversion protégé par une haie pour réduire les venues d'eau sous le remblai et un collecteur enterré dans le fond du vallon en amont et en aval de la route. La fonction de stockage est alors réduite.

V.4.2. Organiser l'écoulement des eaux (objectif 2)

Pour organiser l'écoulement des eaux on peut avoir recours à trois types d'ouvrages :

- les bandes enherbées - les fossés - les drains

Le choix entre les différentes méthodes peut être effectué en fonction des pluies annuelles, de la superficie du bassin versant et de la pente du talweg.

IV.2.1. Les bandes enherbées (moyen 1)

Leur fonction est d'acheminer l'eau en évitant l'incision. Elles sont mises en place au sein d'une même parcelle agricole et doivent être traversées lors des opérations culturales, en prenant la précaution de relever les outils.

L'enherbement est assuré en semant une graminée résistant bien au déchaussement, à une densité plus élevée que pour un herbage (environ 40 kg/ha). Il est réalisé à une période où l'herbe poussera rapidement (de mars à juin et fin août à début septembre). Les meilleurs résultats ont été obtenus avec des variétés à gazon (mélange de Ray-grass anglais et de Fétuque).

V.4.2.2. Les fossés (moyen 2)

Leur fonction est d'acheminer l'eau. Ils n'ont pas pour vocation de retenir les sédiments : il faut donc les protéger des apports extérieurs, par exemple par une bordure d'herbe de faible largeur et éviter que leur profil ne favorise les dépôts. Pour une emprise au sol du même ordre de grandeur que la bande enherbée (5 à 6 m de large), un fossé est capable d'évacuer des débits plus importants compte-tenu de sa section. Mais il nécessite un entretien plus coûteux (curages) et constitue un obstacle infranchissable par les engins.

V.4.2.3. Les drains (moyen 3)

Dans certains cas, un drain peut constituer une alternative au fossé. Il évite de créer un obstacle infranchissable. Cette solution a été proposée dans le cas de micro dépressions ou en exutoire de fossé sur les versants en pente forte

Lorsqu'un aménagement du talweg (bande enherbée, fossé) n'est pas prévu, il vaudra mieux privilégier le recouplement du talweg par plusieurs limites de parcelles, de manière à favoriser une diversité des états de surface.

Chapitre VI

Erosion

Eolienne

Chapitre 6. L'Érosion Éolienne des sols

6.1. Introduction

Au cours de l'histoire géologique de la Terre, un pourcentage substantiel des terres de la planète, en particulier dans les régions arides et semi-arides, a été affecté par l'érosion éolienne. Depuis les années 1980, le changement climatique a entraîné une intensification de ce phénomène dans ces régions. Ce processus naturel, que l'on observe dans les zones où les vents sont forts et sur les terres dépourvues de couverture végétale, exemple les vents de sables dans le Sahara (figure 27), est un exemple de l'impact de l'activité humaine sur l'environnement.

L'érosion éolienne, quant à elle, est un processus naturel de dégradation des sols qui se produit lorsque les particules de terre sont arrachées, transportées et déposées sous l'effet du vent. Ce phénomène se manifeste avec une intensité particulière dans les régions soumises à des climats arides et semi-arides, caractérisées par des sols secs, une végétation limitée et une exposition accrue aux vents forts. Dans le pourtour du bassin méditerranéen, l'érosion éolienne représente une préoccupation écologique majeure pour la viabilité à long terme des écosystèmes et des systèmes agricoles. Cette situation est exacerbée par plusieurs facteurs, notamment les changements climatiques, les pressions démographiques et les activités humaines.

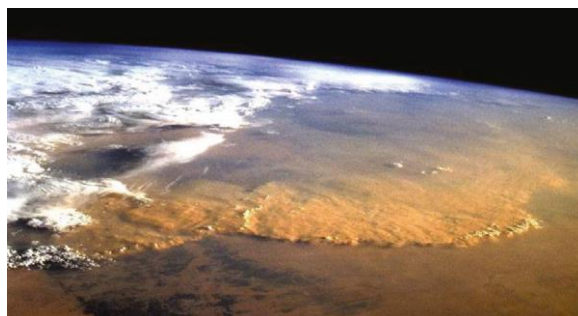


Figure 27 : image par satellite d'un vent de sable dans le Sahara

6.2. Contexte méditerranéen

La région méditerranéenne se caractérise par un climat marqué par une saison sèche prolongée et des précipitations irrégulières, ce qui rend les sols vulnérables à l'érosion. Les vents dominants, comme le sirocco en Afrique du Nord, peuvent atteindre des vitesses suffisantes pour mobiliser d'importantes quantités de particules fines. Les sols sableux et limono-sableux, fréquents dans les zones côtières, les plaines intérieures et les zones sahariennes, sont particulièrement sensibles.

L'érosion éolienne a des conséquences environnementales et socio-économiques importantes :

- Une **perte de fertilité des sols** et réduction des rendements des cultures (exportation de la couche arable riche en matière organique).
- Une **désertification accélérée**, notamment dans les régions déjà fragilisées comme le Sud de l'Espagne, l'Algérie, la Tunisie ou le Maroc.
- Des **impacts sur la santé humaine** (augmentation des tempêtes de poussière, problèmes respiratoires).
- Des **coûts économiques** liés à la dégradation des terres agricoles et à la nécessité de mesures de restauration.

6.3. Mécanismes et Facteurs de l'Érosion Éolienne

6.3.1. Processus physiques du transport éolien

Les processus d'entraînement, de transport et de dépôt des particules impliquent un ensemble d'interactions entre les particules et le flux, entre les particules et la surface, ainsi qu'entre les particules elles-mêmes. Les propriétés physiques des particules individuelles, telles que leur forme, leur taille et leur densité, jouent un rôle important dans ces interactions. Ces propriétés varient considérablement et sont difficiles à mesurer avec précision dans la pratique.

À l'instar de celui de l'eau, le pouvoir érosif du vent augmente avec la vitesse. En effet, le vent n'est véritablement « efficace », c'est-à-dire capable d'arracher et d'emporter des particules solides, qu'à partir d'une certaine vitesse. En 1951, Stallings (USDA-SCS) a introduit le concept de vitesse minimale du vent nécessaire pour initier le mouvement des particules. Pour les particules de sol d'un diamètre compris entre 0,1 mm et 0,15 mm, le seuil de vitesse est de 12 à 14 m/h pour qu'elles commencent à se déplacer (tableau 11). Dans les sols particulièrement sujets à l'érosion, les particules commencent à se déplacer seulement lorsque la vitesse du vent atteint 25 à 30 km/h à 30 cm au-dessus du sol (Biielders et al., 2002). Il convient toutefois de noter que ces données varient également en fonction de l'humidité et de la texture du sol.

Tableau 14. Seuil de vitesse critique des vents en fonction de la texture du sol.

Type de sol dominant	Seuil de vent critique (km/h)	Conditions particulières
Sables limoneux	15–20	Sol sec, faible couvert végétal
Limons sableux	18–25	Surpâturage, sols dénudés
Sables grossiers	20–30	Zones semi-arides, agriculture intensive
Limons éoliens	15–22	Dégradation des parcours steppiques
Cailloutis + limons	25–35	Végétation résiduelle
Argiles érodées	20–28	Sécheresse estivale accentuée

6.3.1.1. Trois mécanismes principaux :

La saltation, désigne le rebond des particules de sable (de 0,1 à 0,5 mm) sur quelques centimètres de hauteur, responsable de 75 % du transport. La saltation est l'un des trois principaux modes de déplacement des particules au cours de l'érosion éolienne, avec la suspension et la reptation (figure 28). Au cours d'un épisode d'érosion, un grand nombre de ces particules sautent le long de la surface dans la direction du vent, entraînant un transport horizontal de la masse du sol.

Reptation : roulement des particules trop grosses pour être soulevées.

Suspension, correspond au transport sur de longues distances des particules fines (inférieures à 0,1 mm, comme les limons et les argiles), formant des nuages de poussière



Figure 28: les Trois mécanismes principaux de l'érosion éolienne

Dans les paysages tracés par les vents, toute la fascination réside dans les déserts, particulièrement le Sahara, qui présente une grande variété de types de dunes de sable aux formes et aux motifs captivants (figure 29). Cependant, en termes d'analyse du processus d'érosion, il s'agit là encore d'un problème complexe. En général, la dynamique des dunes de sable est régie par les interactions entre (1) le flux atmosphérique, (2) le mouvement des grains de sable et (3) les caractéristiques morphologiques des dunes.



Figure 29. Tracés induits par les vents dans un paysage dunaire

6.3.1.2. Poussières et aérosols

Le transport par suspension est à l'origine de l'émission de poussières depuis la surface. L'émission de poussières est un élément clé du cycle global des poussières minérales et du cycle des nutriments qui y est associé. Une fois en suspension dans l'air, les particules de poussière peuvent être diffusées par les turbulences dans les couches supérieures de l'atmosphère, puis être transportées sur de grandes distances par les vents et finalement déposées à la surface. Ce processus appauvrit les particules fines des régions sources de l'érosion éolienne. Dans les zones agricoles, la perte de ces particules entraîne une dégradation progressive des terres, car elles sont principalement riches en nutriments et en matières organiques.

La poussière produite par l'érosion éolienne est une source majeure d'aérosols atmosphériques qui ont un impact sur la qualité de l'air, les conditions météorologiques et le climat. Il n'est pas possible de calculer avec certitude la concentration d'aérosols dans l'atmosphère si le taux d'émission de poussières ne peut être estimé avec précision. Il est donc évident que la détermination de cette quantité est nécessaire, tant pour la conservation des sols que pour les incidences environnementales et socio-économiques.

6.4. Facteurs favorisant l'érosion éolienne

6.4.1. Les facteurs naturels

Des changements soudains dans les conditions météorologiques peuvent provoquer l'érosion éolienne. La vitesse du vent, la texture et la structure du sol, les précipitations, la rugosité de la surface, les pratiques agricoles, la couverture végétale et la taille des champs sont autant de facteurs qui y contribuent.

Les facteurs naturels favorisant l'érosion éolienne sont les suivants :

6.4.1.1. Climat :

Le climat agit essentiellement par : (1) Les sécheresses récurrentes entraînent une réduction de la cohésion et de la résistance au gel du sol. (2) Les vents violents et leur fréquence, comme le sirocco en Algérie et en Tunisie ou le chergui au Maroc.

Dans un climat contrasté, comme le climat méditerranéen (réparti entre une saison chaude et sèche et une saison froide et humide), l'étendue des périodes sèches induit, à l'échelle du champ, des pertes de terre par érosion éolienne supérieures à celles dues à l'érosion hydrique.

6.4.1.2. Sols :

L'érosion éolienne concerne essentiellement la partie la plus fertile du sol, à savoir son horizon de surface, en raison de leurs propriétés intrinsèques telles que la texture légère (sables, limons) et leurs faibles teneurs en matière organique, ce qui leur confère souvent une structure particulière et une faible stabilité structurale, en raison du manque de ciments organiques.

En fonction de la vitesse du vent et de la couverture des parcelles, les effets de l'érosion éolienne peuvent se limiter à l'aire de la parcelle ou s'étendre sur des kilomètres. En effet, à faibles vitesses, les particules arrachées à la surface du sol sont transportées sur de courtes distances et peuvent être déposées en bordure de la parcelle. Ce phénomène de redistribution des particules fines, généralement accompagnées de nutriments, contribue à la formation d'îlots fertiles aux abords des haies, mais aussi de zones pauvres et stériles, érodées jusqu'à la roche mère et laissant apparaître des encroûtements calcaires. Ceci implique que la végétalisation de la surface du sol, la strate herbacée, constitue un frein aux effets néfastes des vents.

6.4.1.3. Végétation :

Couvert végétal discontinu ou absent expose la surface des sols à une forte évaporation et une action directe des facteurs climatiques. En zones arides, l'action du vent se conjugue avec celle de l'eau pour éroder les sols. Un terrain dépourvu de couvert végétal et dénudé par l'abrasion du vent est plus vulnérable à l'érosion hydrique.

Dans les zones où les vents sont forts et où les sols subissent des changements de phase, les pertes sont importantes. En période de sol nu, la perte de végétation associée aux fortes chaleurs accentue les pertes de sols et leur transport à grande distance. Les pratiques agricoles consistant à laisser les sols nus, à ramasser tous les résidus de cultures et à autoriser le pâturage sont un facteur aggravant du processus d'érosion éolienne.

6.4.2. Facteurs anthropiques

Sont représentés par toutes les actions directes ou indirectes induites par l'activité humaine

- **Déforestation** : Réduction des brise-vents naturels et disparition de la végétation, exemple la disparition des Ksour dans les zones saharienne et des oasis.
- **Pratiques agricoles** :
 - Labour excessif (fragilise la structure du sol).
 - Mise à nu des sols entre deux cultures, exemple dans les régions céréalières où les sols sont sans couverture végétale durant la saison sèche.

- **Urbanisation et infrastructures** : Artificialisation des sols accroissant la sensibilité des zones périphériques.

6.5. Impacts de l'Érosion Éolienne

L'érosion éolienne est un phénomène préoccupant dans la région méditerranéenne, particulièrement en Afrique du Nord (Algérie, Tunisie, Maroc). Les conditions climatiques arides et semi-arides, associées à des pratiques agricoles intensives et à des sols fragilisés par une teneur faible en matières organiques, exacerbent les effets néfastes de l'érosion éolienne. Les impacts se manifestent globalement à plusieurs niveaux :

- ✓ Impacts environnementaux : le vent emporte les particules fines et les nutriments essentiels, appauvrissant les sols et réduisant leur fertilité ;
- ✓ Perte de matière organique : le vent emporte les particules fines et les nutriments essentiels, appauvrissant les sols et réduisant leur fertilité.
- ✓ Désertification : l'érosion éolienne accélère l'avancée du désert, notamment dans les zones steppiques algériennes et tunisiennes.

- perte de la biodiversité : la disparition de la couche arable affecte la végétation naturelle et l'ensemble des groupements biologiques associés au sol ;

6.5.1. Impacts sur l'agriculture

L'érosion éolienne a des conséquences majeures sur l'agriculture dans les régions méditerranéennes, en particulier dans les steppes, où les sols steppiques sont très sensibles à la déflation, c'est-à-dire à l'action de soulèvement des grains de sable et des matériaux meubles et secs par la force des vents. Les pertes de particules fines et de nutriments engendrent à court terme des impacts concrets et mesurables sur la production agricole, qui se manifestent par une baisse de la productivité, une modification des systèmes culturaux (adoption obligatoire de brise-vents) et des coûts économiques accrus pour les agriculteurs.

Perte de Fertilité des Sols et Baisse des Rendements

Élimination de la couche arable : les vents forts emportent les particules fines (limon, argile) de la surface du sol et des horizons superficiels. Les premiers centimètres de la couche arable représentent le lit de semence et le berceau des graines. L'élimination de cette couche riche en matière organique laisse un sol appauvri et moins fertile, qui n'est plus adapté à une agriculture performante.

Réduction de la capacité de rétention d'eau : les sols sableux résiduels retiennent moins bien l'eau, ce qui aggrave les stress hydriques, induits notamment par la perte de particules d'argile et de matières organiques.

Exemple en Algérie : dans les Hautes Plaines de M'sila, les pertes de terre peuvent atteindre 30 à 50 tonnes par hectare et par an, réduisant les rendements céréaliers de 20 à 40 %. Madani (2023) explique ces effets sur la production agricole par les éléments suivants : - baisse des rendements agricoles ;

- diminution des espaces de production ;
- déboisement de nouveaux espaces agricoles ;
- ensablement des cultures.

Les effets de la dégradation induits par l'érosion éolienne au niveau des périmètres agricoles des zones des oasis sont régulièrement observés à l'occasion des périodes de vents de sable. Les avancées des dunes sur les périmètres agricoles entraînent :

(i) un enfouissement des cultures temporaire ou permanent, qui peuvent également touchés les palmeraies, nécessitant un désensablement manuel coûteux.

(ii) Un endommagement des plants ; les particules transportées par le vent abrasent les jeunes pousses, affectant notamment les cultures maraîchères.

Au Sahara, à la fin de l'hiver et au début du printemps (de février à avril), l'importante fréquence des vents de sable est accompagnée d'importants flux de sables sur le sol des exploitations agricoles et des palmeraies à proximité des champs de dunes. Par conséquent, les jeunes plantes sont anéanties, desséchées ou recouvertes par les amas de particules de sable, ce qui entraîne des pertes importantes sur récoltes des cultures maraîchères et fourragères.

6.5.2. Impacts sur l'environnement

Le transport par suspension des particules fines constitue la principale source **d'émission de poussières** depuis la surface des sols. L'émission de poussières représente une étape déterminante dans le cycle global des poussières minérales et le cycle des nutriments. Dans l'environnement atmosphérique, les particules de poussière peuvent être soumises à des mouvements de transport. Celles qui sont en suspension dans l'air peuvent se déplacer sur des distances limitées, restant ainsi sur la parcelle. Cependant, les particules peuvent également être transportées sur de grandes distances par les vents. Ce processus est à l'origine de l'appauvrissement en particules fines des sols des régions sources de l'érosion éolienne. Dans les zones agricoles, la perte de poussière est un facteur de dégradation progressive des sols. Il est impératif de déterminer cette quantité, aussi bien pour la conservation des sols que pour les incidences environnementales et socio-économiques.

Des mesures de terrain peuvent être réalisées avec une cuve pyramidale en plexiglas, permettant ainsi de mesurer le dépôt d'aérosols. En Afrique de l'Ouest, les valeurs les plus élevées de ces dépôts sont observées entre les mois de janvier et juin, tandis que les valeurs les plus faibles sont enregistrées durant la saison des pluies. Dans la ville de Dakar, la moyenne journalière interannuelle s'établit à 0,54 gramme par mètre carré et par jour. Cette donnée correspond à un dépôt annuel de 200 grammes par mètre carré (Orange et al., 1990).

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes intéressés aux dépôts de poussières atmosphériques en relation avec les propriétés des eaux et des sols. Notre analyse s'est concentrée sur la contribution de ces dépôts à la composition des eaux de pluie, notamment en ce qui concerne la solubilisation des formes minérales adsorbées par les agrégats du sol. Ces formes minérales sont directement assimilables par les cultures, que ce soit par les feuilles ou les racines. Les poussières atmosphériques sont principalement siliceuses, mais elles comportent également des concentrations notables en bases échangeables, notamment le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le potassium (K) et le sodium (Na). En outre, elles renferment des composés organiques, des

phosphates et des nitrates. Il a été démontré que les poussières atmosphériques ont une incidence sur le pH des eaux de pluie, entraînant une augmentation de leur caractère basique.

Une analyse approfondie des données recueillies dans la région soudanaise a révélé que, parmi l'ensemble des espèces ioniques présentes, le bicarbonate se distingue comme l'ion prédominant. En effet, des études spécifiques ont montré que, dans cette zone géographique, le bicarbonate représente une part significative, oscillant entre 40 et 50 % des apports dissous au sol. Le calcium est le cation majeur, avec un apport au sol qui varie significativement en fonction de la zone climatique, allant de 12 à 3 kilogrammes par hectare et par an.

Au niveau des anions, à l'exception du bicarbonate largement majoritaire, les **chlorures** sont les plus abondants avec un dépôt de l'ordre de **11 à 2 kg/ha/an** en fonction de la zone climatique, on trouve ensuite les **nitrates et sulfates de 7 à 2 kg/ha/an**.

Dans les régions soudanaises, les propriétés chimiques des précipitations sont influencées par les émissions atmosphériques issues de la forêt tropicale et des incendies de forêt. Dans d'autres régions, les précipitations peuvent présenter une acidité due à des émissions atmosphériques végétales, caractérisées par une concentration élevée en acides organiques.

6.5.3. Impacts socioéconomiques

L'érosion éolienne en mer Méditerranée est un sujet de préoccupation qui a des répercussions sur la stabilité socio-économique de la région. Le phénomène d'ensablement, causé par le déplacement des dunes sous l'influence des vents dominants, conduit à une détérioration accélérée des terres cultivables. Dans les régions désertiques du Maghreb et du Moyen-Orient, où l'agriculture est principalement dépendante de systèmes d'irrigation instables, cette dynamique a pour conséquence de réduire significativement la productivité des sols et de mettre en péril la sécurité alimentaire locale. En réponse à cette situation, les populations rurales sont fréquemment contraintes de migrer vers les centres urbains, contribuant ainsi à l'aggravation des zones de précarité périurbaines (Safriel, 2009).

Cette migration forcée exacerbe les déséquilibres territoriaux. Par ailleurs, la raréfaction des terres fertiles et des ressources en eau, combinée à l'ensablement progressif des palmeraies, intensifie les conflits entre agriculteurs, éleveurs nomades et autres acteurs locaux. En Algérie et en Tunisie, par exemple, la compétition pour l'accès à l'eau dans les zones oasiennes est à l'origine de tensions sociales récurrentes. Les études montrent que sans mesures d'adaptation, l'érosion éolienne risque d'amplifier les crises migratoires et les instabilités socio-politiques. La préservation des oasis, qui constituent de véritables « forteresses contre la désertification », apparaît donc comme un enjeu clé pour le développement durable de ces territoires.

6.6. Évaluation de l'érosion éolienne

Dans le cadre de l'étude de l'érosion éolienne, il est essentiel de comprendre le rôle du vent sur la surface du sol. L'impact de ce phénomène naturel dépend de caractéristiques spécifiques et de l'état de la couche superficielle du sol. Pour quantifier cette interaction, on utilise une équation empirique qui, bien qu'adéquate dans certaines situations, présente des limites d'utilisation.

Les modèles et les équations de l'érosion éolienne fournissent des lignes directrices pour quantifier efficacement l'érosion éolienne. Les chercheurs et autres utilisateurs, tels que les agents de vulgarisation en matière de conservation des sols, s'en servent à diverses fins, notamment pour : (i) évaluer les taux d'érosion éolienne, (ii) déterminer les distributions spatiales et temporelles de l'érosion éolienne, (iii) étudier les mécanismes de transport des particules du sol, (iv) analyser les changements dans les conditions de surface et les propriétés du sol, et (v) évaluer les mesures d'atténuation ou de lutte contre l'érosion éolienne du sol.

En général, les modèles d'érosion éolienne sont divisés en trois catégories : - les modèles empiriques ; - les modèles conceptuels ; - les modèles basés sur les processus. L'objectif de ces techniques est de permettre le suivi, la quantification des pertes et la prédiction de l'érosion éolienne (Tableau 15). Les équations et modèles d'érosion éolienne sont utilisées pour estimer les taux d'érosion éolienne, évaluer les mécanismes de transport des particules du sol et les effets des pratiques de gestion des terres sur l'érosion éolienne.

Le tableau 15. Récapitulatif des techniques les plus utilisées dans l'évaluation de l'érosion éolienne.

Technique	Dispositif expérimental de soufflerie	Radionucléides (137Cs, 239+240Pu, 7Be et 210Pbex).	Mesure des propriétés biologiques et physicochimiques.	Anémomètres.
objectifs	Simule les conditions de vent dans un environnement contrôlé pour mesurer les taux d'érosion.	Tracer les mouvements du sol à l'aide d'isotopes radioactifs déposés sur le sol.	Utilisé pour évaluer diverses propriétés du sol afin de déterminer l'érodabilité du sol et le potentiel d'érosion éolienne.	Mesurent la vitesse et la direction du vent à différentes hauteurs au-dessus du sol, fournissant des données importantes pour l'évaluation de l'érosion éolienne.

L'érosion éolienne est souvent modélisée à l'aide de l'équation de **Wind Erosion Prediction Equation (WEQ)**, développée initialement par l'USDA (Woodruff et Siddoway, 1965), puis adaptée pour les régions arides et semi-arides comme l'Algérie et la Tunisie. Cette équation estime la perte annuelle de sol (en tonnes/ha/an) en fonction de plusieurs facteurs.

L'équation utilisée dans le cadre de l'érosion éolienne est la suivante: $E = f(C, K, L, V, I)$ avec

E perte potentielle du sol t/ha/an

C: facteur climatique (vitesse du vent)

K: rugosité de la surface du sol par billons (effet des résidus végétaux et des micro-reliefs)

L: Longueur de la parcelle exposée au vent

V: couverture végétale équivalente (réduction de l'impact du vent)

I: érodabilité du sol qui est fonction de facteurs texture, teneur en matière organique, (pratiques agricoles et leur degré de protection du sol contre l'érosion éolienne)

Chapitre VII

Moyens de lutte

contre l'Erosion

Eolienne

7. La lutte contre l'érosion éolienne

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise à deux niveaux; d'une part réduire la vitesse du vent à la surface du sol, et d'autre part, renforcer la cohésion du matériau

7.1. Cohésion

L'objectif d'améliorer la cohésion des particules minérale du sol est de permettre au sol de résister l'incision des facteurs d'érosion. Un apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore la cimentation des particules, le développement de la structuration du sol et de sa stabilité structurale. Dans le cas d'un environnement de dures, l'épandage de déchets pétroliers, d'huile lourde ou de bitume et de déchets de l'industrie plastique permet d'agglomérer les particules à la surface du sol et de construire une chape empêchant le vent d'agir sur les particules de sables.

L'irrigation d'appoint, en période de fortes rafales de vents, contribue à stabiliser les sols et à éviter les soulèvements de nuées de poussières. En effet, irriguer le sol avant la saison des pluies pour permettre le labour dans de bonnes conditions et l'installation d'un couvert végétal avant les vents.

7.2. Rugosité de surface

Préconiser des techniques culturales laissant à la surface du sol de grosses mottes donne une surface du sol rugueuse réduisant l'effet du vent sur la surface et limitant le transport des fines particules à de faibles distances. Cet objectif peut être réalisé avec la mise en place de billons perpendiculaires à la direction dominante des vents d'une hauteur inférieure à 40 cm. Une autre méthode de lutte améliorant la rugosité est de laisser les résidus de cultures après récolte. On constate, que les tiges de sorgho, de blé ou d'orge laissées après le fauchage permettent de piéger un volume important de poussières mais également les feuilles d'arbres qui sont soufflées par les vents.

7.3. Couvert végétal

Le couvert végétal présent sur un sol est le meilleur garant pour réduire la vitesse du vent. Ceci est évidemment difficile en milieu aride et semi-aride où les pluies se font généralement rares. A cet effet, il est particulièrement important de veiller à mettre à contribution d'autres moyens tels que les résidus de culture, la rugosité du terrain, la protection de la surface du sol par des brise-vents vivant ou inertes (palissades).

✓ les brise-vents

Dans le cas des techniques de protection des parcelles cultivées par les brise-vents, l'objectif est double : (i) ralentir la vitesse du vent ; (ii) réduire l'évaporation.

La figure ci-dessous illustre les effets induits par le brise-vents sur le vent à l'intérieur de la parcelle. En effet la vitesse du vent est réduite sur 10 à 12 fois la hauteur « H » du brise-vent à l'intérieur de la parcelle à des différentes proportions. Ainsi, à dix fois la hauteur de l'obstacle, la vitesse du vent sous le vent est de 56 % de la vitesse du vent local après une paroi de roseaux, 72 % après un brise-vent épais de 20 mètres et 83 % après une bande forestière de 600 m de large (Combeau, 1977).

Cette protection dépend de la perméabilité du brise-vent. Un brise-vents très dense provoque une plus grande réduction de vitesse : si on réduit trop la vitesse, la température s'élève (rouleaux d'air

chaud) et les plantes sont séchées le long du brise-vent. Il est recommandé de maintenir une certaine perméabilité du brise-vents tel qu'indiquer à la figure.

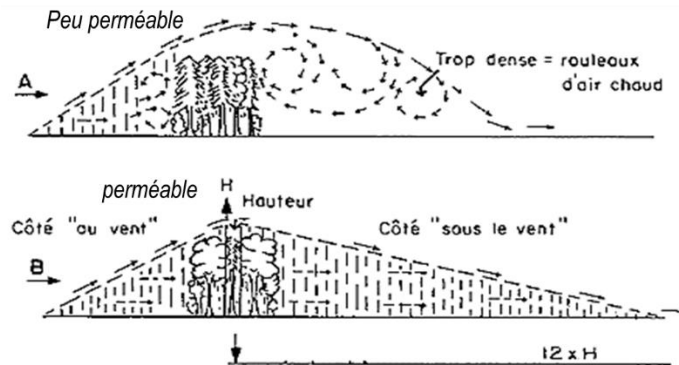


Figure 30. Influence d'un brise-vent sur le vent (d'après Combeau, 1977)

Sur un plan pratique et pour optimiser l'action du brise-vents, il est recommandé de disposer le brise-vents en deux rangs d'arbres élevés, entourés de deux rangs d'arbres bas, soit une bande de dix mètres. La zone cultivée entre les brise-vents peut s'étendre sur 500m pour des arbres dépassant 5m de haut. Pour réduire la concurrence racinaire, on brise les jeunes racines horizontales des arbres dès la première année par un passage de labour (charrue). Ceci implique une certaine attention et entretien agricole des arbres composant le brise-vents. Les espèces couramment utilisées sont les eucalyptus, *casuarina*, divers acacia, le tamaris et le cyprès, auxquelles s'ajoutent les roseaux et cannes de Provence.

✓ Fixation des dunes

Il s'agit d'une part de limiter la mobilité des particules de sables et d'autre part de fixer les dunes sur place. Deux modalités sont essentiellement utilisées : la fixation mécanique et la fixation biologique. En fonction de la direction des vents dominants de leurs fréquences et leurs intensités plusieurs schémas sont préconisés : mis en place de lignes perpendiculaires aux vents avec intervalle équivalents à 20 fois la hauteur de ces lignes. Exemple pour des hauteurs de palmiers dattiers de 1.2m, il faut prévoir (théoriquement) des lignes toutes les 24m. Les matériaux fréquemment utilisés sont tiges de mil, lauriers roses, tiges de sorghos, palmes de palmiers et ou résidus de la taille des forêts ou des plantations arbustives (figure 31).

Dans le cas où les vents violents soufflent de plusieurs côtés, il est fait appel à des schémas de mise en place désignés par **carroyage** avec différents matériaux. La toile plastique perméable avec une maille d'environ 5 à 10 mm sur une hauteur de 0,5 à 1m et déposer avec des espacements d'autant plus petites (3x3 ; 5x5 ou 8x8) que les vents sont violents. L'utilisation des matériaux plastiques pose le problème de leurs pérennités, certaines de ces toiles plastiques sont grillées par les U.V. des rayons solaires et se désintègrent en poudre. Sur le terrain cette technique est accompagnée d'une plantation de plantes herbacées ou arbustives à l'intérieur de ces carroyages qui vont reformer la couverture végétale et fixer définitivement la dune.



Figure 31. Illustrations de palissades érigées pour freiner le mouvement du sable et amendements organiques des sols

Une autre méthode, peu coûteuse et bien adaptée à l'Afrique de l'Ouest, consiste, en pleine saison des pluies, à semer des lignes ou des carroyages de mil ou d'autres espèces végétales qui ont une croissance rapide et qui vont assurer une fixation ultérieure des sols. La protection intégrale de ces sites contre le pâturage et les feux est évidemment indispensable pour assurer la survie déjà difficile des plantations, mais on peut prévoir une exploitation légère et surveillée de la production végétale.

Auprès des côtes, la fixation des dunes constitue une priorité pour la maîtrise de l'avancée de la mer et l'érosion des faces maritimes. Des semis de graines du pin sont utilisés dans le pourtour méditerranéen existant et témoigne de l'adoption de cette technique depuis les siècles passés.

En Résumé,

Il est intéressant de remarquer les similitudes existant entre l'érosion éolienne et l'érosion hydrique en nappe. Les deux formes d'érosion entraînent sélectivement les particules fines de la surface du sol et sont anéanties par le paillage du sol ou par une couverture végétale suffisante: ces deux processus aboutissent à l'appauvrissement en particules fines des horizons superficiels ou à son décapage. Les facteurs sur lesquels on peut jouer sont la couverture du sol, des barrages perméables laissant filtrer lentement le fluide (eau ou vent) et l'amélioration de la structure, de la cohésion et de la rugosité de l'horizon cultivé. Les méthodes de lutte sont donc très voisines: haies vives, brise-vent, gestion des résidus de culture à la surface du sol et couverture végétale dense, labour grossier et buttage ou billonnage cloisonné, réduction de la longueur du champ exposée aux vents dominants ou au ruissellement, amendements organiques ou minéraux.

Chapitre VIII

Conservation des sols dans le contexte Méditerranéen

Conservation des sols dans le contexte méditerranéen

8.1. Introduction

Le sol, en tant qu'écosystème, est le résultat de l'interaction entre les roches, la flore, la faune, l'air et l'eau. En effet, ces éléments sont indispensables à la vie sur Terre. Cette couche superficielle, qui s'étend de quelques centimètres à 300 mètres de profondeur, est essentielle à la pédologie, c'est-à-dire à l'étude du sol en tant que milieu vivant. Elle subit une pression croissante, qui peut être qualifiée de maltraitance, en raison de l'augmentation des activités humaines. Il convient de souligner que les processus de formation et de régénération du sol s'inscrivent dans une temporalité extrêmement longue, avec un rythme de transformation d'un centimètre de sol nécessitant plus de mille ans. Cette caractéristique confère au sol une qualité de ressource non renouvelable à l'échelle temporelle humaine. Ainsi, préserver la vitalité du sol s'avère essentiel pour maintenir sa productivité et la pérennité de l'humanité, tout en contribuant à l'écosystème dans son ensemble.

Les terres cultivables sont une denrée rare sur la planète. Elles couvrent environ 2500 millions d'hectares, ce qui représente environ 22 % des terres émergées, à l'exclusion des zones désertiques et des surfaces couvertes de glace ou d'eau. Il est à noter que de nombreuses terres encore disponibles se situent dans des régions écologiquement sensibles. Celles-ci sont majoritairement couvertes de forêts, à l'instar de l'Amazonie.

8.2. Formes de menaces

Face aux défis de l'urbanisation et de la dégradation des sols, 12 à 16 millions d'hectares de terres cultivables disparaissent chaque année. - Actuellement, **1 600 millions d'hectares sont déjà cultivés**, mais la dégradation des terres continue de s'accélérer.

- D'ici à ce que la population mondiale se stabilise en 2050, **seulement 600 millions d'hectares supplémentaires pourront être exploités**. Or, il faudra produire plus de nourriture alors que la superficie moyenne des terres cultivables par habitant ne cesse de diminuer : de 0,43 ha en 1960 à seulement 0,15 ha prévus pour 2050.

- La banque mondiale (2019) a préconisé que pour **2025**, la moitié des terres irriguées perdront leur productivité en raison de leur salinisation. Chaque naissance nécessite l'exploitation de **un tiers d'hectare supplémentaire**, alors que chaque semaine, **1,5 à 2 millions de personnes supplémentaires** doivent être nourries. - Pour répondre aux besoins alimentaires mondiaux, **30 à 40 millions d'hectares doivent être cultivés chaque année**. Mais à ce rythme, d'ici 2030, les ressources en terre et en eau seront insuffisantes.

8.3. Contexte méditerranéen

Dans le pourtour méditerranéen, le sol subit une détérioration physique, chimique et biologique, altérant ainsi ses capacités fonctionnelles. La dégradation des sols constitue un phénomène de longue date qui s'est significativement accentué au cours des dernières décennies, sous l'influence de divers facteurs naturels (précipitations, vent, ruissellement, etc.) et d'activités anthropiques préjudiciables (surpâturage, surexploitation des ressources forestières, irrigation inappropriée, urbanisation non réglementée, etc.). Les sols sont soumis à des pressions qui peuvent altérer leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques, affectant ainsi leur capacité à remplir leurs fonctions naturelles. Cette détérioration peut prendre plusieurs formes :

- une diminution quantitative du sol, que ce soit en surface ou en profondeur ;
- une altération qualitative, caractérisée par une réduction de la fertilité ;
- divers types de pollution, tels que la salinisation, l'acidification, l'utilisation excessive d'engrais ou de pesticides, ou encore la présence de métaux lourds.

L'**érosion** des sols et la **salinisation** augmentent le risque de désertification des régions les plus vulnérables. 60% des zones rurales méditerranéennes encourent un risque modéré ou important de dégradation de sol, en particulier dans quelques pays (Tunisie, Algérie, Espagne, Grèce, Portugal, Albanie). Environ 300 000 km² de zones côtières européennes subissent une désertification qui touche près de 17 millions de personnes.

8.4. Causes majeures de la dégradation

8.4.1. Pression de l'urbanisation

La construction des habitations et des ouvrages est liée à la croissance démographique et au développement **touristique**, en particulier dans les zones littorales. La plupart des villes se sont installées dans des zones agricoles très riches : c'est le cas de la Mitidja, dans les plaines côtières d'Algérie. Le développement des routes et des autoroutes dévore de plus en plus d'excellentes terres cultivables.

8.4.2. Agriculture intensive

L'épuisement des sols est causé par diverses activités anthropiques, telles que la surexploitation, le surpâturage ou les mauvais traitements liés à des techniques « culturales » inadaptées. Dans certains pays, tels que l'Égypte, la Syrie ou la Tunisie, des problèmes de salinisation des sols sont observés. Ces problèmes résultent d'une utilisation intensive des eaux d'irrigation, qui entraîne une remontée de l'eau dans le sol et une augmentation progressive de la concentration en sel lors de l'évaporation. Ce processus peut conduire à une stérilisation du sol.

Dans d'autres pays, la monoculture, c'est-à-dire la culture intensive de produits de grande consommation tels que le coton, le soja ou le maïs, a parfois entraîné une diminution de la matière organique du sol et, par conséquent, une perte de fertilité. De manière générale, l'utilisation excessive de nutriments par les cultures intensives entraîne un « appauvrissement du sol » par rapport à sa capacité d'autorégénération.

Dans de nombreux pays, la pratique généralisée de l'utilisation intensive de pesticides a également joué un rôle déterminant dans la dégradation des sols, entraînant une altération de leur qualité.

8.4.3. Erosion hydrique et éolienne

Dans la région méditerranéenne, le climat, le relief accidenté (pentes abruptes et fort morcellement), ainsi que la longue histoire de l'intervention humaine ont entraîné des taux d'érosion plus alarmants que dans d'autres régions de la planète.

L'**érosion hydrique** est due à l'excès ou à la violence des pluies. Un ruissellement intense entraîne la disparition de quantités de terres considérables et principalement de la couche la plus fertile des sols fragiles. L'érosion hydrique, due à l'intensité des précipitations, est une des principales causes de cette dégradation. En effet, lors des épisodes de fortes pluies, l'eau ruisselante entraîne une

quantité importante de terre, principalement la couche superficielle des sols, qui est la plus fertile et la plus sensible. Cela a pour effet de réduire la capacité des sols à soutenir la végétation, en éliminant les nutriments essentiels et en rendant ces terrains moins productifs. Cette érosion est particulièrement problématique dans les zones agricoles, où les sols sont déjà fragilisés par les cultures intensives et le manque de couverture végétale adéquate.

L'érosion éolienne se manifeste surtout dans les zones arides et semi-arides, due à l'arrachement par le vent des particules fines de la surface du sol. La menace pour les sols est

- soit d'être recouverts par des sables ou des dunes apportées par le vent,
- soit d'être réduits à l'état de squelette après la disparition des éléments fins emportés par le vent.

L'érosion éolienne constitue également une menace importante dans les zones méditerranéennes, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Ce type d'érosion se manifeste lorsque des vents forts emportent les particules fines du sol, créant un phénomène d'arrachement. Les particules fines, principalement des sables et des poussières, sont soulevées par les rafales de vent et transportées sur de grandes distances. Dans certains cas, ces particules fines peuvent se redéposer sous forme de dunes ou de couches de sable, recouvrant ainsi les sols et rendant difficile la régénération de la végétation.

Cependant, l'érosion éolienne peut aussi avoir des conséquences plus dramatiques pour les sols eux-mêmes. Si les vents emportent suffisamment de matière fine, le sol peut être réduit à un véritable "squelette", ne laissant plus que des particules grossières comme des cailloux ou des graviers.

8.4.4. Facteurs aggravants

- **La déforestation**

La surexploitation ou de mauvaises pratiques agricoles constituent les facteurs aggravants. Un sol nu, dénué de tout couvert végétal, forêt, pâturages ou cultures agricoles, devient extrêmement sensible à l'érosion par la pluie ou le vent. La déforestation, souvent causée par l'agriculture et l'exploitation forestière, est l'un des facteurs aggravants les plus graves de l'érosion des sols. Les arbres et les plantes jouent un rôle crucial dans la protection des sols en stabilisant le sol grâce à leurs racines et en réduisant l'impact des pluies et du vent. La disparition de la couverture végétale expose directement les sols aux agents érosifs tels que le vent et l'eau.

- **Pratiques pastorales**

Le surpâturage dans certaines régions méditerranéennes contribue à la dégradation des sols. L'herbivorisme excessif réduit la couverture végétale, ce qui laisse les sols vulnérables aux phénomènes de ruissellement et d'érosion éolienne. Le surpâturage ou l'augmentation du nombre de têtes à l'hectare, provoque également une compaction du sol, ce qui diminue sa perméabilité et accroît le ruissellement.

En zones steppiques, les causes de la désertification sont nombreuses. La cause naturelle principale est bien connue : la sécheresse. Les causes anthropiques (démographie, surpâturages, défrichement des parcours et leurs causes,...) le sont moins. En outre, les dernières décennies ont connu une

diminution notable de la pluviosité annuelle, avec parfois plusieurs années consécutives de sécheresse persistante. L'effectif du cheptel pâturent en zones steppiques - dont la composante prédominante est la race ovine (environ 80% du cheptel), en 1968, La steppe était déjà surpâturée, la charge pastorale réelle était deux fois plus élevée que la charge potentielle (Nedjraoui et Badrani 2008).

- **Sols fragiles et peu profonds**

Dans certaines régions méditerranéennes, les sols sont naturellement fragiles, peu profonds et peu fertiles. Ces sols sont facilement érodés, en particulier lorsqu'ils sont exposés à des pratiques agricoles inappropriées (surpâturage, monoculture, ...), à des pentes fortes, ou à des conditions climatiques extrêmes.

- **Incendies**

Le feu est la cause principale de la destruction des forêts dans les pays du Bassin méditerranéen. Environ 50000 incendies ravagent chaque année de 700000 ha à 1 million d'ha de forêt méditerranéenne, causant des dommages écologiques et économiques énormes, ainsi que des pertes de vies humaines. Les incendies provoquent une accentuation considérable de l'érosion hydrique sur les bassins versant. Sous couvert végétal, l'érosion hydrique est très faible dans les massifs à l'échelle du bassin versant. Les pertes de terre annuelles moyennes mesurées sur des bassins versants boisés sont inférieures à 6 t/km² (Martin et allée, 2000). L'essentiel des transports en suspension provient, dans ce cas, de l'érosion des pistes.

- **Changements climatiques**

Les effets du changement climatique, notamment l'augmentation des températures et l'intensification des événements climatiques extrêmes (comme les pluies torrentielles et les sécheresses prolongées), aggravent les phénomènes d'érosion. L'intensification du ruissellement et des sécheresses accentue la vulnérabilité des sols, perturbant leur régénération naturelle et leur capacité à retenir l'eau.

8.4.5. Effets environnementaux et socioéconomiques

- Sur le plan environnemental, la dégradation des sols contribue à la perte de la fertilité des sols, de carbone, d'azote et de biodiversité, à la diminution de la capacité de rétention de l'eau, à la perturbation des cycles des gaz et des nutriments et à la réduction de la dégradation des contaminants.

La détérioration des sols influence ainsi directement la qualité de l'eau et de l'air, la biodiversité et les changements climatiques.

- Du point de vue socioéconomique, le phénomène réduit la productivité agricole, contribue à la détérioration de la qualité de vie des habitants, en réduisant leur capacité à s'approvisionner en aliments, bois et eau. Il peut également altérer la santé de la population. L'augmentation de la mortalité infantile, la réduction de l'espérance de vie, la pauvreté et les famines sont associées à la désertification et à la dégradation des sols qui génère des dépendances financières importantes.

8.5. Dispositions institutionnelles

Contrairement au changement climatique ou la biodiversité qui relèvent de l'environnement, le sol n'est pas considéré comme un bien public mondial et ne fait pas l'objet de mesures de protection spécifiques.

En Méditerranée, tous les gouvernements ont ratifié la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (1994), qui les engage à lancer des initiatives nationales et régionales pour la protection des sols (amélioration de la législation, nouvelles lois, politiques à long terme et programmes d'action). Au niveau des pays la situation est très inégale et seuls neuf d'entre eux possèdent une législation spécifique en matière de protection des sols, répondant souvent à un risque déterminé, notamment la pollution.

En Résumé

L'érosion des sols en Méditerranée a des conséquences graves, notamment la perte de fertilité, la désertification accrue dans certaines régions, et des impacts environnementaux tels que l'envasement des barrages et les inondations. Environ 60% des zones rurales méditerranéennes sont exposées à un risque modéré ou important de dégradation du sol. La combinaison de ces facteurs souligne l'importance d'une gestion durable des ressources naturelles pour atténuer les effets de l'érosion et préserver les sols méditerranéens. L'érosion des sols en région méditerranéenne est un problème complexe qui résulte d'un ensemble de facteurs naturels et humains. Les conditions climatiques particulières, le relief accidenté et les pratiques humaines non durables contribuent à l'aggravation de ce phénomène. Pour limiter ces impacts, des stratégies de gestion intégrée des sols, telles que la reforestation, la mise en place de pratiques agricoles durables et la conservation des terres, sont essentielles.

Encadré :

Il n'existe pas, à l'échelle planétaire d'estimations fiables de la dégradation des sols induite par l'érosion (Lal, 1990). Globalement on estime que, les surfaces affectées par l'érosion hydrique s'élevaient à 1094 millions d'hectares et celles affectées par l'érosion éolienne à 548 millions d'hectares (tableau ci-contre). Sur la base de la superficie totale concernée, l'étendue de l'érosion hydrique à l'échelle continentale suit l'ordre suivant : Asie>Afrique>Amérique du Sud > Europe> Océanie > Amérique du Nord > Amérique centrale. Tandis que l'érosion éolienne présente une étendue selon les continent respectant l'ordre suivant : Asie > Afrique>Amérique du Sud = Europe > Amérique du Nord > Océanie>Amérique centrale.

Le climat et le sol sont les facteurs les plus importants qui déterminent l'étendue et la gravité de la dégradation des sols. L'érosion des sols et la dégradation des terres qui l'accompagne sont plus graves dans les climats chauds et secs que dans les climats frais et humides (Lal, 1990).

L'érosion et la dégradation des sols sont des problèmes graves en Afrique, ceci a été attribué à de nombreuses causes, dont la déforestation tropicale, le surpâturage des animaux d'élevage et de la faune sauvage en Afrique orientale, l'agriculture extensive, la faible fertilité des sols et la faible capacité de rétention de l'eau.

Tableau 16: Etendue (million ha) de l'érosion hydrique et éolienne selon les continents (d'après Oldeman 1994).

continent	Erosion Hydrique	Erosion Eolienne
Afrique	227	186
Asie	441	222
Amérique du sud	123	42
Amérique centrale	46	5
Amérique du nord	60	35
Europe	114	42
l'Océanie	83	16
totale	1094	548

Références Bibliographiques.

- Auzet, A. V., Guerrini, M. C., & Muxart, T. (1992). L'agriculture et l'érosion des sols: importance en France de l'érosion liée aux pratiques agricoles. *Économie rurale*, 208(1), 105-110.
- Bouaziz1, N. et Melbouci, B. 2014. Caractérisation de l'aléa glissement de terrain en Kabylie (Tizi-Ouzou) Algérie. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014 – Beauvais 8-10 juillet 2014.
- Bougdal R., Larriere A., Pincet P., Panet M., Bentabet A., (2013) .Les glissements de terrain du quartier Bélouizdad, Constantine, Algérie *Bull Eng Geol Environ* 72:189–202.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Couturier, A., Bourcennane, H., and Souchere, V. (2002). Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil and Tillage Research* 67, 99-108.
- Chassiot, L., Lajeunesse P, and J.-F. Bernier, Riverbank erosion in cold environments: Review and outlook, *Earth-Science Reviews* (2020), <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103231>
- Demmak, A. (1982). Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale (Doctoral dissertation, éditeur non identifié).
- Foster, I. D., Boardman, J., and Keay-Bright, J. (2007). Sediment tracing and environmental history for two small catchments, Karoo Uplands, South Africa. *Geomorphology* 90, 126-143.
- Hardie, M, Cotching WE, Zund P (2007) Rehabilitation of field tunnel erosion using techniques developed for construction with dispersive soils. *Australian Journal of Soil Research* 45(4) 280–287.
- Hopkins, E.S. 1937. Soil drift control. Canadian Department of Agricultural Publications.
- Lafforgue, A. (1977). Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol* 14, 299-344.
- Lal, R. and Stewart, B. A., Eds. 1994. *Soil Processes and Water Quality*. Adv. Soil Sci., CRC/Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 398 pp.
- Le Bissonnais, Y., Dubreuil, N., Daroussin, J., and Gorce, M. (2004). Modélisation et cartographie de l'aléa d'érosion des sols à l'échelle régionale. *Etude et Gestion des Sols* 11, 3.
- Lilin, C., & Koohafkan, A. P. (1987). Techniques biologiques de conservation des sols en Haïti.
- Madani D (2023). Étude d'impacts de la dégradation des terres liée à la désertification sur le paysage et le volet
- Martin, C., & Allee, P. (2000). Impact d'un incendie de forêt sur l'érosion hydrique dans le bassin versant du Rimbaud (massif des Maures, Var). *Forêt méditerranéenne*, 21(2), 163-169.
- Moore I.D., Foster G.R., Hydraulics of overlandflow, in: Anderson M.G., Burt T.P. (Eds.), *Process Studies in Hillslope Hydrology*, John Wiley, Chicester, 1990, pp. 215–253.
- Mounirou, L. A. (2012). Etude du ruissellement et de l'érosion à différentes échelles spatiales sur le bassin versant de Tougou en zone sahélienne du Burkina Faso: quantification et transposition des données, Montpellier 2.
- Oldeman, L. R. 1994. The global extent of soil degradation. In: Greenland, D. J. and Szabolcs, I., Eds., *Soil Resilience and Sustainable Land Use*, CAB International, Wallingford, U.K., 99-118.
- Omar Djoukbala; Mahmoud Hasbaia; Oussama Benselama; Mohamed Mazour (2019). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Ombeau A. (1977). Erosion et conservation des sols (plus particulièrement en zone tropicale). Paris :ORSTOM, 85 p.
- Roose É, Sabir M, Arabi M, Morsli B et Mazour M (2012). Soixante années de recherches en coopération sur l'érosion hydrique et la lutte antiérosive au Maghreb. *Géographie physique et environnement*. Vol 06-2012
- Roose, É., and De Noni, G. (2004). Recherches sur l'érosion hydrique en Afrique: revue et perspectives. *Science et changements planétaires/Sécheresse* 15, 121-129.
- Safriel, U. (2009). Deserts and desertification: Challenges but also opportunities. *Land Degradation & Development*, 20(4), 353-366.
- Salomon, J. N., Cosandey Claude et Robinson Mark, 2000-Hydrologie. *Les Cahiers d'Outre-Mer*, 53(212), 405-405.
- Wells, R. R., Momm, H. G., Bennett, S. J., Gesch, K. R., Dabney, S. M., Cruse, R., & Wilson, G. V. (2016). A measurement method for rill and ephemeral gully erosion assessments. *Soil Science Society of America Journal*, 80(1), 203-214.

Résumé

La conservation des sols revêt une importance capitale dans la stratégie de **protection des écosystèmes terrestres et aquatiques**. La compréhension des **mécanismes d'érosion** hydrique ou éolienne et la mise en place de moyens de lutte et de contrôle nécessitent des approches de gestion durable adaptées aux spécificités de chaque territoire en termes de climat, de relief, de pratiques agricoles, etc. De plus, la conservation des sols permet non seulement de préserver la productivité agricole, mais aussi de protéger les ressources hydriques, de réguler le cycle de l'eau et de maintenir la biodiversité.

Ce polycopié a pour objectif de fournir aux étudiants de licence en sciences agronomiques une base théorique et méthodologique solide sur les dynamiques de l'érosion, **les indicateurs de dégradation** des sols et **les techniques de lutte**. La conservation des sols est abordée en tenant compte de sa relation avec les connaissances acquises en pédologie, en hydrologie et en agronomie générale. Les chapitres développés sont les suivants :

- Érosion hydrique : origine et mécanismes ;
- Formes de l'érosion hydrique ;
- Moyens et techniques de quantification ;
- Moyens et méthodes de protection des sols ;
- Érosion éolienne et conservation des sols dans le contexte méditerranéen.

Des études de cas et des outils de calcul des pertes de sol sont introduits sous forme d'exercices pratiques (TD) à l'aide d'équations mathématiques (Wind Erosion Prediction Equation, Universal Soil Loss Equation).

L'érosion entraîne **l'appauvrissement des sols** en éléments nutritifs, **la pollution des cours d'eau** et l'envasement des barrages, ce qui menace directement notre **sécurité alimentaire**. Ce polycopié intègre la conservation des sols dans une approche globale de gestion des ressources naturelles, en tenant compte des impératifs environnementaux, socio-économiques et climatiques.

Mots clés : Conservation des sols, mécanismes de l'érosion, érosion hydrique, érosion éolienne, équation de quantification de l'érosion, méthodes de protection des sols