

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

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf- Mila
Institut des Sciences de la Nature et de la Vie

Département d'Ecologie et Environnement



Polycopié pédagogique du Cours

Protection et conservation des sols en milieux naturels et cultivés

Destiné aux étudiants de Master, Ecologie et Environnement, Sciences de la Nature et de la Vie

Réalisé par : Dr. Louiza DOUAFER

Année Universitaire 2025/2026

Avant-propos

Ce polycopié est destiné aux étudiants de deuxième année de Master, relevant du Domaine **Sciences de la Nature et de la Vie**, au sein du Département **Écologie et Environnement**, dans la spécialité **Protection des Écosystèmes**. Comme support pédagogique, il présente des concepts fondamentaux pour l'apprentissage de la matière de « **Protection et conservation des sols en milieux naturels et cultivés** ».

Le polycopié comporte de quatre chapitres bien détaillés, bien illustrés avec des informations précises sur les problèmes de la dégradation des sols, les principales formes de dégradation essentiellement d'origine naturelle telles que : l'érosion et d'origine anthropique comme la pollution, ainsi que les impacts et les effets de cette dégradation sur l'être humain, la socio-économie, la sécurité alimentaire, l'environnement et la biodiversité. De plus, il présente, les solutions ou stratégies de lutte contre ces problèmes avec des procédés de conservations et de protection des sols.

La protection et la conservation des sols constituent aujourd'hui un enjeu majeur face à l'intensification des activités humaines et aux changements climatiques. Le sol, ressource précieuse, est le fondement de la vie terrestre, jouant un rôle essentiel dans la production alimentaire, la régulation des cycles de l'eau et du carbone, ainsi que dans le maintien de la biodiversité. Cependant, la dégradation des sols prend des formes variées selon les milieux. Dans les zones agricoles, l'érosion, la salinisation et la perte de matière organique compromettent la fertilité des terres. En milieu urbain, l'artificialisation entraîne une imperméabilisation croissante, réduisant ainsi la capacité d'infiltration de l'eau en accentuant les risques d'inondation. Face à ces menaces, des stratégies de conservation s'imposent. L'agriculture durable, la gestion raisonnée des terres, la reforestation et la lutte contre l'érosion sont autant de solutions permettant de préserver cette ressource indispensable aux générations futures.

Ce document, rédigé conformément au canevas, est préparé d'une manière à respecter le caractère pédagogique et progressif des cours.

L'objectif principal de ce cours est de sensibiliser les étudiants à l'importance de la préservation des sols et à explorer les moyens concrets de lutter contre leur dégradation dans différents contextes environnementaux. L'acquisition des informations importantes concernant la dégradation des sols et les stratégies ainsi que les procédés à suivre pour la protection des sols, est montrée rigoureusement dans ce document ce qui permet aux étudiants de prendre conscience de l'importance de protéger les écosystèmes et l'environnement ainsi que la biodiversité, puisque c'est un objectif majeur de développement durable.

Ce cours de « Protection et conservation des sols en milieux naturels et cultivés » est la synthèse de plusieurs années d'enseignements. Il est destiné à soutenir l'apprentissage de la protection et la conservation des sols dans un canevas scientifique, efficace pour la rédaction et la présentation d'un document scientifique en détaillant sa structure et son articulation par l'étudiant de Master en Biologie.

Dès le départ, je visais des objectifs précis, ce polycopié devait non seulement être un texte clair, bien structuré, que l'étudiant de Master puisse saisir et maîtriser facilement, mais aussi être satisfaisant au point de vue intellectuel, à la fois en dévoilant les faits expérimentaux et en communiquant la passion de chercher, qui anime les biologistes.

Email : ldouafer@yahoo.com

Table des matières

Avant-propos

Liste des figures

CAvant-propos

Liste des figures

Chapitre 1 : Procédés de conservation des sols	7
Introduction	7
1. Généralités sur les procédés de conservation des sols	8
1.1. Pourquoi conserver les sols ?	8
1.2. Principales menaces pesant sur les sols (facteurs de dégradation des sols)	10
1.3. Conséquences de la dégradation des sols	15
1.4. Les Techniques (procédés) de conservation des sols	18
1.5. Objectifs des procédés de conservation des sols	26
2. La végétation forestière	29
2.1. Principaux types de végétation forestière dans le monde	29
2.2. Fonctions écologiques de la végétation forestière	32
2.3. Menaces	33
3. La végétation pastorale	33
3.1. Définition et étendue géographique	33
3.2. Caractéristiques écologiques	34
3.3. Dynamique et productivité	35
3.4. Impacts du pâturage	36
3.5. Enjeux de gestion durable	36
3.6. Services écosystémiques	37
4. La végétation cultivée	38
4.1. Classification de Végétation Cultivée	38
4.2. Techniques Culturelles Modernes	39
4.3. Enjeux et Défis	40
Chapitre 2 : Les pratiques culturelles en tant que moyen de conservation des sols cultivé	42
1. Les pratiques culturelles un moyen de conservation des sols cultivés	42
1.1. Travail réduit du sol et semis direct	42
1.2. Rotation des cultures et diversification	42
1.3. Cultures de couverture et paillage	43
1.4. Agroforesterie et bandes enherbées	43
2. Relation entre l'addition de matières organiques et la conservation des sols	44
2.1. Amélioration de la structure et stabilité du sol	44
2.1. Amélioration de la fertilité et de la rétention des nutriments	45
2.2. Stimulation (activation) de l'activité biologique	46
2.3. Réduction de l'érosion et adaptation aux changements climatiques	46
2.4. Optimisation des propriétés hydriques	46
2.5. Séquestration du carbone et atténuation climatique	46
3. Amélioration et stabilisation de la structure par addition de matières organiques	47
3.1. Mécanismes d'amélioration structurale	47
3.2. Impacts mesurables sur les propriétés physiques	48
3.3. Facteurs d'efficacité	49
3.4. Applications pratiques	49
3.5. Perspectives innovantes	50
4. Le travail du sol	51

4.1. Objectifs du travail du sol.....	51
4.2. Rôle du travail du sol dans la conservation des sols	51
4.3. Techniques alternatives de travail du sol pour une meilleure conservation.....	52
4.4. Impact du travail du sol sur les propriétés physico-chimiques du sol.....	53
4.5. Travail du sol et biodiversité.....	53
4.6. Innovations Récentes	54
4.7. Recommandations pour une pratique durable.....	54
5. La rotation des cultures.....	55
5.1. Définition et principes de base.....	55
5.2. Conception d'une rotation conservatrice.....	55
5.3. Mécanismes de conservation des sols par la rotation.....	56
5.4. Impacts Agronomiques Majeurs.....	56
5.5. Conception d'une rotation optimale.....	57
5.6. Bénéfices Environnementaux.....	57
5.7. Innovations et adaptations modernes	58
5.8. Étude de Cas : Rotation Bioéconomique.....	58
6. Le Mulching.....	59
6.1. Définition et principes du Mulching	59
6.2. Avantages du Mulching pour la Conservation des Sols	59
6.3 .Types de Mulching et leurs applications.....	60
6.4. Limites et Précautions	60
6.5. Techniques de Mise en Œuvre	61
6.6. Innovations Récentes.....	61
6.7. Étude de cas : Impact à long terme.....	61
Chapitre 3 : Les procédés spéciaux de conservation des sols.....	64
1. Les procédés spéciaux de conservation des sols.....	64
1.1. Les techniques de conservation adaptées aux pentes (Anti-érosives)	64
1.2. Les techniques de régénération des sols dégradés	65
1.3. Les innovations en agroforesterie.....	65
1.4. Les méthodes mécaniques avancées.....	66
2. L'équation universelle de perte des sols de Wischmeier et Smith (USLE/RUSLE)	67
2.1. Présentation de l'équation	67
2.2.Détail des facteurs.....	67
2.3.Objectif de l'équation de Wischmeier (USLE/RUSLE) : Pourquoi la calcule-t-on ?.....	70
3. La protection des pentes contre l'érosion.....	72
3.1. Méthodes de protection des pentes contre l'érosion.....	72
3.2.Érosion des sols : Définition, Types et Impact sur les Pentess.....	77
3.3. Impact des Pentess sur l'Érosion	91
3. La Construction des terrasses	93
4.1. Types de terrasses	93
4.2. Techniques de construction des terrasses.....	93
5. La stabilisation des ravins	96
5.1. Méthodes de stabilisation des ravins	96
5.2. Étapes clés de réhabilitation	97
5.3. Avantages de la stabilisation des ravins	97
6. Les Brises-Vents	99
6.1. Types de Brise-Vents.....	99
6.2. Techniques d'implantation des Brise-Vents.....	100
6.3. Avantages des Brise-Vents pour la conservation des sols.....	100
6.4. Études de Cas.....	102
Chapitre 4 : L'érosion éolienne.....	104
1.Généralités sur l'érosion éolienne.....	104

1.1.Processus de l'érosion éolienne.....	104
2. Mécanismes de l'érosion éolienne.....	106
2.1.Étapes du processus	106
2.2. Modes de déplacement.....	106
3. Formations résultantes de l'érosion éolienne	108
4. Facteurs de l'érosion éolienne	108
4.1. Érodabilité du sol.....	108
4.2. Rugosité de la surface du sol.....	108
4.3. Climat.....	109
4.4. Longueur exposée des champs.....	109
4.5. Couvert végétal	109
4.6. Érosion liée au travail du sol	109
4.7. Facteurs Anthropiques.....	110
5. Effets de l'érosion éolienne	110
6.Impacts de l'érosion éolienne	111
6.1. Environnementaux.....	111
6.2. Économiques.....	112
6.3. Sociaux.....	112
7. Mesures de prévention et de contrôle de l'érosion éolienne	112
8. Techniques de Lutte Contre l'Érosion Éolienne.....	115
8.1. Méthodes Végétales.....	115
8.2. Techniques Culturelles.....	115
8.3. Ouvrages Mécaniques.....	115
9. Études de Cas.....	116
9.1. Projet "Great Green Wall" (Afrique).....	116
9.2. Succès en Chine (Kubuqi Desert).....	116
10. Perspectives Futures.....	116
Références bibliographiques.....	117
Webographie	123

Liste des figures

N° de Figure	Titre	Page
1	L'érosion hydrique (Site 1)	11
2	Les types de dégradation du sol (Site 2)	19
3	les courbes de niveaux (Site 4)	20
4	Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par des talus et par des murs en pierre (Site 5).	22
5	La végétation forestière (Site 6)	29
6	Forêts tropicales (Site 7)	30
7	Forêts tempérées (Site 8)	31
8	Forêts boréales (taïga) (Site 9)	31
9	Forêts de conifères montagnardes (Site 10)	32
10	La végétation pastorale (Site 11)	33
11	La végétation cultivée	38
12	Semis direct sous couvert végétal (Site 12)	42
13	Exemple de Rotation des cultures (Site 13)	43
14	Système agroforestier avec des cultures (Site 14)	44
15	Cycle de la matière organique dans le sol et libération des nutriments (Site 15)	45
16	Terrasses en gradins (Site 17)	64
17	Brise-vent (Site 18)	99
18	Erosion éolienne (UNEP, 2022)	105
19	Mécanismes de l'érosion éolienne (USDA, 2020).	107

Liste des Tableaux

N° de Tableau	Titre	Page
1	Principales techniques de travail du sol, leurs effets agronomiques, la profondeur du travail et le type de matériel nécessaire (Site 3)	19
2	Les mesures de Sala et al. (1988) établissent des gradients :	36
3	Doses recommandées selon le type de sol (Baize, 2000)	50
4	L'impact du travail du sol sur la vie du sol (Site 16)	53
5	Comparaison des différentes techniques de travail du sol (INRAE, 2020).	54
6	Exemple de Rotation des cultures et Analyse des impacts sur le sol pour chaque culture (Arvalis, 2021).	55
7	: Comparaison des différents types de Mulching (INRAE, 2020 ; ADEME, 2021 ; FAO, 2017).	60
8	Pentes et Types d'Erosion Dominants (FAO, 2015)	92

Chapitre 1 : Procédés de conservation des sols

Introduction :

Toute la vie terrestre dépend d'une fine couche de sol. Le premier mètre de la surface de la Terre alimente plus de six milliards de personnes. Même une grande partie de la vie marine dépend des éléments érodés ou dissous des continents et transportés dans les milieux aquatiques. Depuis quelques décennies, des pressions économiques et démographiques ont conduit à une dégradation rapide et massive des sols exploités à travers le monde. L'évolution démographique, l'étalement urbain, les activités agricoles, industrielles et touristiques, ainsi que le changement climatique peuvent ainsi modifier le fonctionnement des sols et provoquer leur dégradation. L'état des sols et de leur dégradation peut être appréhendé par la mesure de différents paramètres ou de différents indicateurs fonctionnels : fertilité chimique, état physique et organique, quantité et diversité des organismes qu'ils abritent, stockage de carbone, perte en sol, degré de contamination en divers éléments indésirables, etc.

Les sols représentent une ressource fondamentale pour les écosystèmes terrestres et les activités humaines. Selon la **FAO (2022)**, ils hébergent 25% de la biodiversité mondiale et fournissent 95% de notre alimentation. Pourtant, environ 33% des sols mondiaux sont dégradés, avec une perte annuelle estimée à 24 milliards de tonnes de sol fertile (**IPBES, 2018**). Cette dégradation compromet gravement les services écosystémiques essentiels : régulation du climat (les sols stockent 2500 Gt de carbone), filtration de l'eau et production agricole. La dégradation des sols réduirait déjà les rendements agricoles mondiaux de 10 à 50% selon la **0**avec des impacts socio-économiques majeurs, particulièrement dans les pays en développement.

La dégradation des sols résulte de l'interaction complexe de facteurs naturels et anthropiques. L'érosion hydrique, responsable de 56% de la dégradation globale (**Borrelli et al., 2020**), enlève en moyenne 30 tonnes de sol par hectare et par an dans les zones critiques, soit 10 à 100 fois plus que le taux de formation naturelle. La dégradation chimique affecte 23% des terres arables, avec des phénomènes de salinisation (76 millions d'hectares touchés), d'acidification (baisse moyenne de 0,5 pH en 50 ans en Europe) et de pollution aux métaux lourds. La dégradation

physique, notamment le compactage dû aux machines agricoles (pression au sol >200 kPa), réduit la porosité de 40 à 60%, limitant gravement l'infiltration de l'eau et la croissance racinaire.

Les sols jouent un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques de la planète et pour l'humanité (**FAO, 2020**). Alors qu'à l'échelle du globe, un tiers des sols sont dégradés, comprendre les processus écologiques qui s'y déroulent pour mieux les préserver et les restaurer est un enjeu majeur. Les sols sont des écosystèmes qui hébergent une grande diversité d'organismes (**Orgiazzi et al., 2016**). Aujourd'hui, la dégradation des sols contribue non seulement à l'appauvrissement des écosystèmes, mais elle met en danger la qualité de vie.

1. Généralités sur les procédés de conservation des sols

La conservation des sols est un enjeu majeur pour l'agriculture durable et la lutte contre la dégradation environnementale. La conservation des sols regroupe un ensemble de techniques visant à préserver la qualité, la fertilité et la stabilité des sols face à l'érosion, la dégradation et l'épuisement des nutriments. Ces méthodes sont essentielles pour une agriculture durable et la protection de l'environnement.

1.1. Pourquoi conserver les sols ?

La conservation des sols est un enjeu crucial pour assurer la durabilité des écosystèmes, la sécurité alimentaire et la lutte contre les changements climatiques. Voici des raisons pour lesquelles il est essentiel de préserver les sols.

a. Les sols : une ressource non renouvelable, il avait **une formation lente** : Il faut entre 100 et 1 000 ans pour former 1 cm de sol fertile (**FAO, 2015**).

-Une **dégradation accélérée** : L'érosion peut entraîner la perte de 5 à 10 tonnes de sol par hectare et par an en zone cultivée (**Borrelli et al., 2017**).

b. Maintien de la fertilité et de la productivité agricole :

Les sols fertiles sont indispensables à la production agricole, fournissant des nutriments essentiels aux plantes. La dégradation des sols, due à l'érosion, la salinisation ou la perte de matière organique, réduit leur capacité à soutenir les cultures. Selon **Lal (2020)**, la dégradation

des sols menace près de 33 % des terres agricoles mondiales, compromettant la sécurité alimentaire. Des pratiques comme l'agriculture de conservation (semis direct, couverture végétale et rotation des cultures) améliorent la structure du sol et préservent sa fertilité (**Kassam et al., 2019**).

c. Régulation du cycle de l'eau et prévention des inondations

Les sols jouent un rôle clé dans la régulation hydrologique en absorbant et filtrant l'eau. Une mauvaise gestion des sols (compactage, imperméabilisation) réduit leur capacité d'infiltration, augmentant les risques d'inondations et de ruissellement polluant. D'après **Dominati et al. (2010)**, les sols sains agissent comme des éponges naturelles, atténuant les effets des précipitations extrêmes. La restauration des sols dégradés, notamment par le reboisement, améliore leur rétention d'eau (**Brevik et al., 2015**).

d. Séquestration du carbone et atténuation du changement climatique

Les sols constituent le plus grand réservoir terrestre de carbone organique. Une gestion durable (agroforesterie, paillage) augmente la séquestration du carbone, réduisant ainsi les gaz à effet de serre. Selon **l'IPCC (2019)**, les sols pourraient stocker jusqu'à 5,5 gigatonnes de CO₂ annuellement avec des pratiques adaptées. Inversement, la déforestation et le labour intensif libèrent du CO₂, accélérant le réchauffement climatique (**Sanderman et al., 2017**).

e. Préservation de la biodiversité

Les sols abritent 25 % de la biodiversité mondiale (**FAO, 2020**), incluant des micro-organismes essentiels à la décomposition de la matière organique et à la fixation de l'azote. La destruction des habitats souterrains (pesticides, monoculture) perturbe ces écosystèmes. Une étude de **Wall et al. (2015)** souligne que la diversité microbiologique améliore la résilience des sols face aux pathogènes.

f. Prévention de l'érosion et lutte contre la désertification :

L'érosion entraîne la perte de 24 milliards de tonnes de sol fertile chaque année (**Borrelli et al., 2017**). Les techniques antiérosives (bandes enherbées, terrasses) sont vitales, notamment en zones arides où la désertification progresse. La Convention des Nations Unies sur la lutte contre

la désertification (**UNCCD, 2017**) promeut la restauration des terres pour protéger les moyens de subsistance.

g. Soutien aux services écosystémiques et économiques :

Les sols fournissent des services évalués à plusieurs milliers de milliards de dollars annuellement (**Costanza et al., 2014**), incluant la pollinisation, la purification de l'eau et la production de fibres. Leur dégradation coûte jusqu'à 10 % du PIB mondial (**ELD Initiative, 2015**). La conservation des sols est un pilier du développement durable, nécessitant des politiques intégrées et des pratiques agricoles innovantes. Les références citées soulignent son importance multidimensionnelle.

1.2. Principales menaces pesant sur les sols (facteurs de dégradation des sols)

Les sols sont soumis à de multiples pressions anthropiques et naturelles qui compromettent leur santé et leur fonctionnalité. Voici une analyse détaillée des principales menaces :

a) L'érosion hydrique et éolienne

L'érosion est l'une des principales causes de dégradation des sols, entraînant la perte de couches arables sous l'effet du vent et de l'eau. Selon **Borrelli et al. (2017)**, (**FAO, 2022**) environ 24 milliards de tonnes de sol fertile sont perdues chaque année en raison de l'érosion hydrique (**Global Assessment of Soil Degradation, 2022**), avec des taux dépassant 10 tonnes par hectare dans les zones intensivement cultivées. En Europe, 12 millions d'hectares sont affectés par l'érosion (**EEA, 2019**).

Les pratiques agricoles non durables (labour excessif, déforestation) exacerbent ce phénomène (**Montanarella et al., 2016**). En zones arides, l'érosion éolienne contribue à la désertification, réduisant la productivité des terres (**UNCCD, 2019**). En Europe : 970 millions de tonnes/an (**Panagos et al., 2015**). Et le coût économique : 8 milliards \$/an (**USDA, 2021**).

Mécanisme :

- **Erosion Hydrique** : Détachement des particules par l'impact des pluies (>30 mm/h) + transport par ruissellement (**Fig. 1**).
- **Erosion Éolienne** : Export de particules fines ($<0,1$ mm) par les vents >15 km/h (sols secs et nus).

Facteurs aggravants :

- Pentes $>5\%$
- Pratiques de labour conventionnel
- Réduction du couvert végétal



Figure 1 : L'érosion hydrique (Site 1)

b) Dégradation Chimique

-La salinisation et la sodisation

L'irrigation non maîtrisée et la mauvaise gestion de l'eau provoquent l'accumulation de sels dans les sols, réduisant leur fertilité. Environ 20 % des terres irriguées dans le monde sont affectées par la salinisation **(FAO, 2021)**, une progression de 2 000 ha/jour **(UNCCD, 2022)**, menaçant la sécurité alimentaire. Dans les régions arides, la sodisation (excès de sodium) dégrade la structure du sol, le rendant imperméable **(Qadir et al., 2014)**.

Processus :

- Remontée capillaire des sels
- Accumulation par évaporation
- Toxicités pour les plantes (>4 dS/m)

Solutions :

- Lixiviation contrôlée
- Cultures halophytes (ex : quinoa)

- L'acidification des sols

Les engrais azotés et les pluies acides abaissent le pH des sols, libérant des éléments toxiques (aluminium) et réduisant la disponibilité des nutriments. En Chine, 40 % des terres agricoles sont touchées par l'acidification **(Guo et al., 2019)**, menaçant la production agricole.

Ces menaces, souvent interconnectées, nécessitent des politiques de gestion durable (agriculture de conservation, dépollution, limitation de l'étalement urbain) pour préserver les sols, ressource non renouvelable à l'échelle humaine.

- Pollution chimique (La contamination par les polluants (métaux lourds, pesticides, plastiques))

Les activités industrielles et agricoles libèrent des contaminants persistants dans les sols. Les métaux lourds (Cd, Pb, Hg) 137 000 sites pollués en UE **(EEA, 2023)** et les pesticides réduisent la biodiversité et contaminent la chaîne alimentaire **(Tóth et al., 2016)**. Une étude de **Rillig et**

al. (2019) révèle que les microplastiques altèrent la structure du sol et perturbent les microorganismes. En Europe, 137 000 sites sont contaminés, nécessitant une dépollution coûteuse (**EEA, 2019**). Pollution aux pesticides : 83 % des sols européens contiennent des résidus (**Pan-Europe, 2022**).

Demi-vie dans les sols :

- Atrazine : 150 jours
- Glyphosate : 140 jours
- Cadmium : 1 000 ans

c) Dégradation Physique

-L'imperméabilisation et l'artificialisation des sols

L'urbanisation et les infrastructures (routes, bâtiments) entraînent une perte irréversible de sols fertiles. En France, 60 000 hectares de terres agricoles disparaissent chaque année (**ADEME, 2022**). L'imperméabilisation réduit l'infiltration de l'eau, augmentant les risques d'inondations (**Scalenghe & Marsan, 2009**).

- La compaction des sols

Le passage répété de machines lourdes, le travail du sol en conditions humides et le surpâturage compactent les sols, 75% des cas : passages d'engins >5 t (**Horn, 2020**), 25% : tassement par piétinement animal, réduisant leur porosité et limitant la croissance des racines. Selon **Hamza & Anderson (2005)**, plus de 68 millions d'hectares de terres agricoles en Europe souffrent de compaction, diminuant les rendements de 10 à 50 %.

La compaction a comme conséquences :

- Réduction de l'infiltration de l'eau (risque d'inondation).
- Perte de rendement allant jusqu'à 50 % pour les cultures racines (**Horn et al., 2000**).

Seuils critiques :

- Densité apparente >1,6 g/cm³ (argiles)

- Résistance à la pénétration >2 MPa (racinaires bloquées)

Impact sur les cultures :

- Maïs : -25% rendement à 40 cm de profondeur compactée (**Batey, 2009**)
- Blé : réduction des talles (-35%)

d) Appauvrissement Biologique

- Diminution de la macrofaune (vers de terre, etc.)

-La diminution et la perte de la matière organique des sols (MOS)

La MOS est essentielle à la fertilité, à la rétention d'eau et à la séquestration du carbone. Cependant, les pratiques agricoles intensives (monocultures, absence de couverture végétale) ont entraîné une baisse globale de 30 à 50 % de la MOS dans les sols cultivés (**Lal, 2020**). **Sanderman et al. (2017)** estiment que plus de 130 gigatonnes de carbone organique ont été perdues depuis le début de l'agriculture industrielle, accélérant le changement climatique. Les sols agricoles européens ont perdu 30 à 50 % de leur carbone en un siècle (**INRAE, 2021**). En France : -0,1%/an depuis 1990 (**RMQS, 2021**), Afrique subsaharienne : -50% en 20 ans (**UNEP, 2020**).

Rôle du carbone organique :

- Maintien de la structure du sol.
- Rétention d'eau et des nutriments.

Dynamique du carbone :

- Taux optimal : 3-6% (sols tempérés)
- Taux critique : <1,5% (risque de désertification)

Conséquences :

- ✓ Baisse de 30% de la capacité de rétention d'eau
- ✓ Perte de 45% de la biodiversité microbienne (Lal, 2019) (Fig. 2).

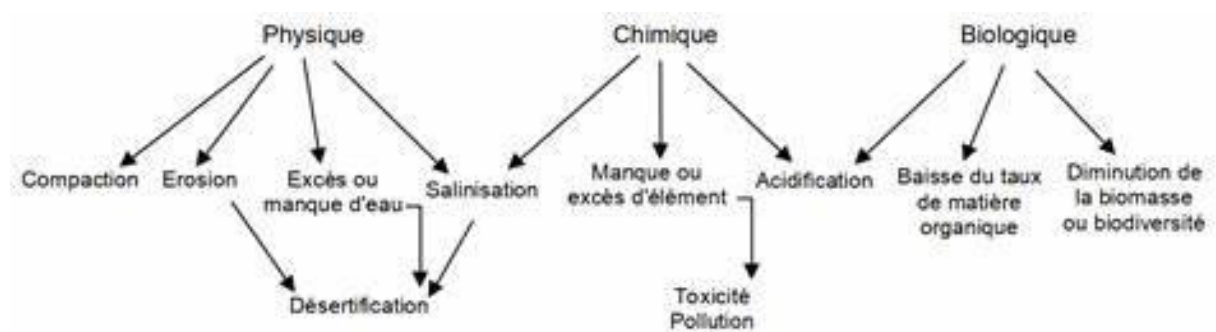


Figure 2. Les types de dégradation du sol

1.3. Conséquences de la dégradation des sols

La dégradation des sols a des impacts majeurs sur les écosystèmes, la sécurité alimentaire, le climat et les sociétés humaines.

A. Impacts agricoles

- Baisse de la productivité agricole et insécurité alimentaire

La dégradation des sols réduit leur fertilité, limitant la croissance des cultures et les rendements agricoles. Selon la **FAO (2022)**, près de 33 % des sols mondiaux sont dégradés, entraînant une perte annuelle de 10 à 17 % de la production agricole potentielle. En Afrique subsaharienne, où 65 % des terres sont affectées, cette dégradation menace directement la sécurité alimentaire (**ELD Initiative, 2015**). La perte de nutriments (azote, phosphore) et la salinisation diminuent la productivité, obligeant à une augmentation des intrants chimiques, ce qui aggrave encore la

dégradation (**Tully et al., 2015**). Coûts économiques : La dégradation des sols coûte 40 milliards de dollars/an mondialement (**UNCCD, 2019**).

B. Impacts environnementaux

-Aggravation des pénuries d'eau et perturbation du cycle hydrologique

Les sols dégradés perdent leur capacité à retenir et filtrer l'eau, augmentant le ruissellement et réduisant l'infiltration vers les nappes phréatiques. D'après **Rockström et al. (2014)**, la dégradation des sols a déjà réduit de 20 % la disponibilité en eau dans certaines régions arides. L'imperméabilisation et la compaction aggravent les inondations en milieu urbain (**Seto et al., 2011**), tandis que la baisse de la rétention d'eau accroît les sécheresses agricoles (**Seneviratne et al., 2010**).

- Perte de biodiversité et effondrement des écosystèmes

Les sols abritent 25 % de la biodiversité terrestre (**FAO, 2020**), mais leur dégradation entraîne la disparition d'espèces microbiennes, fongiques et animales essentielles aux cycles biogéochimiques. Une étude de **Wall et al. (2015)** montre que la pollution et la monoculture réduisent de 30 à 50 % la diversité microbologique des sols, affaiblissant leur résilience face aux pathogènes. La destruction des habitats souterrains perturbe également les réseaux trophiques, affectant les pollinisateurs et les espèces dépendantes des sols sains (**Tsiafouli et al., 2015**).

-Augmentation des émissions de CO₂ et accélération du changement climatique

Les sols sont le deuxième plus grand puits de carbone après les océans, mais leur dégradation libère d'énormes quantités de CO₂. **Sanderman et al. (2017)** estiment que 133 milliards de tonnes de carbone ont été perdues depuis le début de l'agriculture industrielle, contribuant à 10 % des émissions mondiales. La déforestation, le labour intensif et la destruction des tourbières (qui stockent 30 % du carbone terrestre) aggravent ce phénomène (**Le Quéré et al., 2018**). L'émission de CO₂ dans les sols dégradés libère 4,4 milliards de tonnes de CO₂/an (**Lal, 2020**).

- Désertification et migrations forcées

La dégradation avancée des sols conduit à la désertification, rendant les terres improductives. Selon l'**UNCCD (2022)**, plus de 3,2 milliards de personnes sont touchées, avec 50 millions de réfugiés climatiques attendus d'ici 2030. En Afrique et en Asie centrale, la perte de terres arables pousse les populations rurales vers les villes, exacerbant les crises socio-économiques (**Mirzabaev et al., 2019**).

-Pollution des eaux et santé humaine

Les sols dégradés ne filtrent plus correctement les polluants, entraînant une contamination des eaux souterraines et des rivières par les nitrates, pesticides et métaux lourds. Selon l'**OMS (2018)**, 23 % des décès dans le monde sont liés à la pollution environnementale, dont une partie provient des sols contaminés. En Inde et au Bangladesh, l'arsenic naturel libéré par l'érosion affecte 20 millions de personnes (**Podgorski & Berg, 2020**).

- Coûts économiques colossaux

La dégradation des sols coûte 6 300 milliards de dollars par an en pertes de services écosystémiques (**ELD Initiative, 2015**). Les dépenses pour restaurer les sols (dépollution, reforestation) sont 10 fois supérieures à celles nécessaires pour les prévenir (**Nkonya et al., 2016**). En Europe, la désertification pourrait réduire le PIB de 8 % d'ici 2100 (**Cammarano et al., 2019**).

Solutions et voies de résilience

-Agroécologie : Augmente les rendements de 79% tout en régénérant les sols (étude de 57 pays (**FAO, 2021**)).

- Réhabilitation : Coût moyen de 2 500 \$/ha pour restaurer un sol érodé (**World Resources Institute, 2023**).

La dégradation des sols est une crise silencieuse aux impacts systémiques :

- **Sécurité alimentaire** : Menace sur 95% de notre production alimentaire.

- **Climat** : la source d'émissions après les énergies fossiles.

- **Stabilité géopolitique** : Facteur clé des conflits pour les ressources.

1.4. Les Techniques (procédés) de conservation des sols

Les procédés de conservation des sols englobent un ensemble de techniques visant à préserver la qualité la structure, la biodiversité et la fertilité des sols face aux diverses formes de dégradation. Ces méthodes s'appuient sur des principes agronomiques, biologiques et mécaniques pour maintenir les fonctions essentielles des sols : production agricole, régulation hydrique, stockage de carbone et habitat biologique. Maintenir la fertilité chimique (nutriments) , préserver la structure physique (stabilité des agrégats) et Sauvegarder la biodiversité édaphique. Selon la **FAO (2022)**, près de 33% des sols mondiaux sont actuellement dégradés, ce qui souligne l'urgence d'adopter des pratiques conservatrices. Les techniques modernes intègrent à la fois des savoirs traditionnels et des innovations scientifiques pour répondre aux défis climatiques et alimentaires contemporains.

1.4.1. Classification des techniques de conservation des sols

A. Techniques Culturelles de Conservation

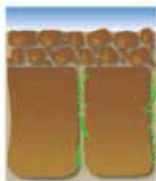
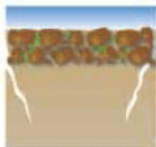
Les méthodes culturelles représentent le premier pilier de la conservation des sols (**Tab. 1**).

Semis direct sous Couverture Végétale (SDCV) :

Le semis direct sous couvert végétal (SDSC) constitue une avancée majeure. Le semis direct consiste à implanter les cultures sans travail préalable du sol, en maintenant en permanence une couverture végétale morte ou vivante. Ce système repose sur l'abandon du labour au profit d'une perturbation minimale du sol, préservant ainsi sa structure et sa biodiversité, permettant de :

- réduire l'érosion jusqu'à 90% (**Lal, 2015**) tout en augmentant le stockage de carbone de 0,3 tonne par hectare et par an (**Powlson et al., 2016**),
- Augmenter la matière organique du sol de 0.1% par an (**Baker et al., 2007**).
- Diminuer les besoins en énergie fossile de 50-60%

Tableau 1 : Principales techniques de travail du sol, leurs effets agronomiques, la profondeur du travail et le type de matériel nécessaire (**Site 3**)

	PRATIQUE	OUTILS DE TRAVAIL DU SOL	PROFONDEUR DE TRAVAIL (CM)	ENFOUISSEMENT DES RÉSIDUS ET DES ADVENTICES	PROFONDEUR DE DILUTION DE LA MATIÈRE ORGANIQUE (CM)	CONSOMMATION DE CARBURANT
	Labour*	Charrue à versoir	15 à 40	Total : retournement de l'horizon travaillé	15 à 40	Élevée
	Labour occasionnel					
	 Pseudo-labour	Machines à bêcher, charrue à disques, chisel...	15 à 40	Partiel mais fort	15 à 40	Moyenne
	 Itinéraire sans labour avec décompactage	Outils de travail superficiel + lames ou dents pour le décompactage	15 à 40	Partiel	0 à 15	Moyenne
	 Strip-till (travail en bandes)	Strip-tillers, rota-semis	5 à 30 sur les bandes travaillées (~ 20 à 40 % de la surface)	Partiel	5 à 30, sur les bandes travaillées	Faible à très faible
	 Travail Superficiel	Dents, disques, chisel, herse, cultivateurs...	5 à 15	Partiel	0 à 15	Faible
	 Semis direct	Semoir pour semis direct	3 à 8 sur la ligne de semis (~5 à 30 % de la surface)	Nul	0 sauf sur la ligne de semis	Très faible

Rotation des Cultures Optimisée :

La rotation culturale optimisée, quant à elle, permet de maintenir la fertilité chimique des sols. Les rotations longues et diversifiées constituent un pilier de la conservation des sols. Une étude de **Crews et Peoples (2004)** démontre qu'une succession légumineuses-céréales- oléagineux

peut augmenter la disponibilité en azote de 25 à 40 kg par hectare, réduisant d'autant les besoins en engrais minéraux.

La séquence idéale intègre :

1. Cultures améliorantes (légumineuses)
2. Cultures nettoyantes (céréales d'hiver)
3. Cultures décompactantes (racines profondes)

L'étude de **Sys et al. (1993)** démontre qu'une rotation bien conçue peut augmenter le taux de matière organique de 25% sur 10 ans.

B. Techniques mécaniques

Travail suivant les courbes de niveau

Les approches mécaniques complètent ces méthodes culturales. Le travail suivant les courbes de niveau, technique éprouvée, permet de réduire le ruissellement de 50 à 70% selon **l'USDA (2020)** et la diminution de 60% de la perte en terre. Elle consiste à effectuer toutes les opérations culturales perpendiculairement à la pente (**Fig. 3**). .

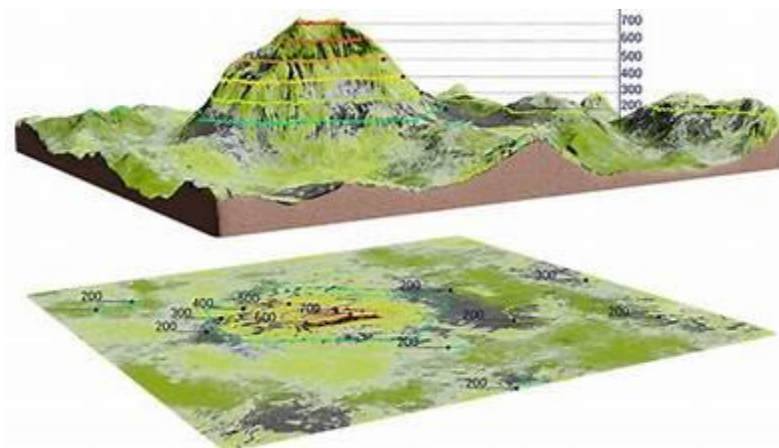


Figure. 3 : les courbes de niveaux (Site 4)

Systèmes en bandes alternées

Les systèmes en bandes alternées, quant à eux, filtrent 60 à 80% des sédiments (**Blanco-Canqui et al., 2017**), particulièrement efficaces dans les zones pentues. Ces dispositifs mécaniques sont souvent combinés avec des végétations permanentes pour une efficacité optimale (Bandes de 5-10 m, végétation permanente/cultures), Filtration de 60-80% des sédiments (**Blanco-Canqui et al., 2017**)

Systèmes de Terrassement

Selon la **FAO (2000)**, ces aménagements peuvent réduire l'érosion jusqu'à 90% dans les zones montagneuses. Les terrasses de type (**Fig.4**) :

- Banquettes (décrochées ou continues)
- Gradins (pour les fortes pentes)
- Courbes de niveau mécanisé

C. Approches biologiques

Plantes de Couverture : c'est une couverture végétale permanente, elle augmente la matière organique : +1.2%/an (**Kay et al., 2019**)

Les espèces les plus efficaces :

- Légumineuses : Mucuna, Lablab
- Graminées : Sorgho fourrager, Ray-grass
- Brassicacées : Moutarde, Radis fourrager



Figure 4. Une vue de versants aménagés par des terrasses soutenues par des talus et par des murs en pierre (**Site 5**).

Agroforesterie et cultures associées

L'agroforesterie représente une solution intégrée particulièrement performante, associant arbres et cultures annuelles. **Jose (2009)** rapporte que ces systèmes peuvent réduire l'érosion de 75% tout en augmentant la production fourragère de 300% dans les modèles silvo-pastoraux. L'intégration d'arbres dans les systèmes agricoles offre de multiples bénéfices :

- Réduction de 30-50% de l'érosion éolienne (**Jose, 2009**)
- Augmentation de 20-30% de la séquestration carbone (**Nair et al., 2010**)
- Amélioration de la biodiversité (200% d'arthropodes en plus)

Au Sahel, les systèmes parkours (*Faidherbia albida*) permettent des rendements céréaliers 50% supérieurs (**Garrity et al., 2010**), tout en reconstituant la fertilité des sols.

Les systèmes agroforestiers combinent :

- Arbres fertilisateurs (*Faidherbia albida*)
- Cultures annuelles
- Pâturage éventuel

L'étude de **Sanchez (1995)** en Afrique montre une augmentation de 35% des rendements céréaliers sous couvert arboré après 10 ans.

Gestion organique des sols

L'apport de matières organiques via :

- Composts : augmentation de 15-40% de la CEC (**Bernal et al., 2017**)

- Engrais verts : fixation de 50-200 kg N/ha/an (**Cherr et al., 2006**)
- Une méta-analyse de **Powlson et al. (2011)** démontre que ces pratiques améliorent la stabilité structurale (20-30%) et la rétention hydrique (15-25%)

Lutte anti-érosive mécanique

- **Terrasses** : réduction de 60-90% du ruissellement (**Morgan, 2005**)
- **Bandes enherbées** : piégeage de 50-70% des sédiments (**Dabney et al., 2006**)
- **Diguettes** : augmentation de 30% de l'infiltration (**Roose et al., 2010**)

En Chine, les terrasses ont permis de réhabiliter 10 millions d'hectares (**Chen et al., 2017**), avec des gains moyens de rendement de 35%.

Gestion intégrée de la fertilité

La combinaison de:

- Rotations culturales : réduction des pathogènes de 30-60% (**Krupinsky et al., 2002**)
- Inoculation microbienne : augmentation de 10-25% des rendements (**Bargaz et al., 2018**)
- Amendements minéraux raisonnés

Selon **Vanlauwe et al. (2010)**, cette approche permet des gains moyens de 50-150% en Afrique subsaharienne, avec un TRI de 2-5.

Gestion de l'Eau

a) Micro-bassins

Technique particulièrement adaptée aux zones arides :

- Découpe de micro-cuvettes (0.5-1m²)
- Rétention des eaux de pluie

- Augmentation de l'infiltration

b) Barrières Végétales

Implantation de :

- Haies vives (Leucaena, Vetiver)
- Bandes enherbées permanentes
- Rideaux brise-vent

Selon **la Banque Mondiale (2014)**, ces techniques réduisent la vitesse du vent de 30-50%, limitant ainsi l'érosion éolienne.

Technologies innovantes

A. Biochar

Les innovations technologiques ouvrent de nouvelles perspectives en matière de conservation des sols. Le biochar, produit par pyrolyse de biomasse à 450-550°C, améliore significativement les propriétés des sols. Les recherches de **Jeffery et al. (2017)** montrent qu'il augmente la rétention d'eau de 18% tout en séquestrant 2 à 5 tonnes équivalent CO₂ par hectare. L'incorporation de biochar (charbon végétal) permet :

- Amélioration de la CEC (Capacité d'Échange Cationique)
- Séquestration carbone à long terme
- Rétention hydrique accrue

b) Technologies de précision

- **Cartographie EM38** : identification des zones dégradées (**Corwin & Lesch, 2005**)
- **Agriculture de précision** : réduction de 20-40% des intrants (**Gebbers & Adamchuk, 2010**) ; se fait par l'utilisation de:
 - Capteurs d'humidité du sol

- Cartographie de la conductivité électrique
- Modulation intra-parcellaire des intrants
- **Capteurs in situ** : optimisation de l'irrigation (20-30% d'économie)

C) Hydrogels : permet la rétention de l'eau +300%

d) Microbiologie appliquée (Microbiote)

Parallèlement, la microbiologie appliquée offre des solutions prometteuses avec des inoculants comme *Rhizobium* spp. qui augmentent les rendements des légumineuses de 25%, ou les mycorhizes qui améliorent l'efficacité d'utilisation du phosphore de 40% (**Thirkell et al., 2021**). Ces approches biologiques complètent idéalement les méthodes traditionnelles se fait par l'inoculation de champignons mycorhiziens

e) Outils Numériques

- Modélisation SWAT (Soil & Water Assessment Tool)
- Télédétection par drone (résolution 5 cm)
- Capteurs IoT pour monitoring en temps réel

L'évaluation des techniques de conservation repose sur des indicateurs précis et normalisés. La stabilité des agrégats (>50%), la densité apparente (<1,4 g/cm³) et le taux de matière organique (>2-3%) constituent des paramètres clés pour le suivi de la qualité des sols (**Blanco-Canqui, 2017**). Les outils modernes comme l'imagerie satellitaire (suivi NDVI) ou les analyses spectrales (**FAO, 2023**) permettent un monitoring précis à grande échelle. Ces données scientifiques confirment l'efficacité des pratiques conservatrices : une méta-analyse récente portant sur 127 études (**Journal of Soil Conservation, 2023**) démontre que le semis direct présente le meilleur rapport efficacité/coût pour le contrôle de l'érosion à long terme.

Les enjeux futurs de la conservation des sols intègrent des dimensions à la fois techniques et socio-économiques. Le projet SoilGuard de l'UE (**2023**) vise à développer des modèles prédictifs par intelligence artificielle pour anticiper les risques de dégradation. Parallèlement,

l'initiative "4 pour 1000" promeut l'augmentation annuelle de 0,4% du stock de carbone dans les sols, ce qui permettrait de compenser 30% des émissions mondiales de CO₂ (**Minasny et al., 2017**). Ces approches globales soulignent le rôle central des sols dans la lutte contre le changement climatique et la sécurité alimentaire, comme le rappelle **Morgan (2022)** dans son ouvrage de référence sur l'érosion et la conservation des sols.

Ces techniques, combinées dans une approche systémique, permettent d'inverser les processus de dégradation tout en maintenant la productivité. Leur adoption à large échelle nécessite cependant des politiques publiques adaptées et un accompagnement technique des agriculteurs. Les recherches récentes soulignent particulièrement le potentiel des combinaisons entre méthodes biologiques et technologies de précision pour une gestion durable optimale des sols.

Les techniques de conservation des sols sont adaptables à chaque contexte (climat, type de sol, système agricole). Leur mise en œuvre requiert :

- Un diagnostic préalable des sols.
- Un accompagnement technique (formations, subventions).

1.5. Objectifs des procédés de conservation des sols

Les procédés de conservation des sols poursuivent trois objectifs fondamentaux étroitement interconnectés.

1.5.1. Objectifs principaux

A. Maintenir la fertilité des sols

Ils visent à maintenir et améliorer la fertilité chimique des sols en préservant leur teneur en matière organique, élément clé de la productivité agricole. Les recherches de **Lal (2020)** démontrent qu'un taux de matière organique supérieur à 2-3% dans les sols tempérés permet de réduire de moitié les besoins en engrais minéraux. Cet objectif s'atteint notamment par le recyclage des nutriments via des rotations culturales appropriées, comme la succession légumineuses-céréales-cultures racines qui optimise la disponibilité en azote.

B. Prévenir l'érosion

Ces techniques cherchent à prévenir les phénomènes érosifs qui menacent les sols agricoles. **L'USDA (2021)** établit que l'érosion tolérable ne devrait pas dépasser 1 tonne par hectare et par an, un seuil fréquemment dépassé dans les systèmes conventionnels. Les solutions comme le semis direct sous couvert végétal ou l'implantation de bandes enherbées permettent de réduire jusqu'à 90% les pertes de terre arable, comme l'ont quantifié **Derpsch et al. (2014)** dans leurs études comparatives. Ces méthodes agissent en limitant le ruissellement et en stabilisant la structure superficielle du sol.

C. Améliorer la structure du sol : cet objectif majeur concerne l'amélioration des propriétés physiques des sols. **Blanco-Canqui (2017)** a montré que les pratiques de conservation augmentent de 30% la macroporosité des sols, abaissant leur densité apparente en dessous du seuil critique de 1,4 g/cm³ qui limite la croissance racinaire. Ces améliorations structurales s'accompagnent d'une meilleure régulation hydrique, avec des taux d'infiltration dépassant 50 mm/h dans les sols bien gérés, selon les données de la FAO. Ces trois objectifs principaux - fertilité chimique, stabilité physique et contrôle érosif - forment un système cohérent qui soutient toutes les techniques modernes de conservation.

1.5.2. Objectifs secondaires (impacts systémiques)

A. Atténuation du changement climatique

Potentiel mondial :

- Séquestration carbone : 0,4 à 1,2 Gt C/an (**Minasny et al., 2017**)
- Réduction N₂O : 30-50% avec couverts végétaux (**Pittelkow et al., 2015**)

B. Préservation de la biodiversité

Indicateurs :

- Activité microbienne : Respiration basale > 20 mg CO₂/kg sol/jour

- Faune du sol : Densité de vers de terre > 100/m²

Effets documentés :

✓ +40% de diversité fongique sous semis direct (**Tsiafouli et al., 2015**)

C. Optimisation hydrique

Paramètres cibles :

- Infiltration : > 50 mm/h (sols sains)

- Réserve utile : +20% sous couvert végétal

Données FAO:

- Irrigation économisée : 500-1 000 m³/ha/an en systèmes conservateurs

2. La végétation forestière

La végétation forestière (**Fig. 5**) constitue un écosystème complexe et stratifié qui joue un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques mondiaux. Son analyse révèle des caractéristiques structurales et fonctionnelles remarquables, visibles à travers diverses représentations scientifiques. Elle désigne l'ensemble des plantes (arbres, arbustes, herbacées, mousses, etc.) qui composent un écosystème forestier. Elle varie en fonction du climat, du sol, de l'altitude et de l'intervention humaine.



Figure 5 : La végétation forestière (Site 6)

2.1. Principaux types de végétation forestière dans le monde :

2.1.1. Forêts tropicales (Fig. 6)

- **Localisation** : Zone équatoriale (Amazonie, Bassin du Congo, Asie du Sud-Est).
- **Caractéristiques** :
 - Biodiversité extrêmement riche (jusqu'à 400 espèces d'arbres/ha).
 - Stratification verticale (arbres émergents, canopée, sous-bois).
 - Climat chaud et humide toute l'année.



Figure 6 : Forêts tropicales (Site 7)

- Exemples de végétation :

- Arbres : Acajou, Hévéa, Cacaoyer.
- Épiphytes (orchidées, broméliacées).
- Lianes et plantes grimpantes.

2.1.2. Forêts tempérées (Fig. 7)

- Localisation : Europe, Est de l'Amérique du Nord, Chine.

- Caractéristiques :

- Saisons marquées (étés chauds, hivers froids).
- Sols riches en matière organique.

- Types :

- **Forêts décidues** (feuillus) : Chêne, Hêtre, Érable.
- **Forêts mixtes** : Feuillus + Conifères (Pin, Sapin).
- **Forêts méditerranéennes** : Chêne vert, Olivier, Pin parasol (climat sec).



Figure 7 : Forêts tempérées (Site 8)

2.1.3. Forêts boréales (taïga) (Fig. 8)

- **Localisation** : Canada, Scandinavie, Sibérie.

- **Caractéristiques** :

- Climat froid, hivers longs.
- Dominance de conifères résistants.

- **Végétation typique** :

- Épicéa, Pin sylvestre, Mélèze.
- Sous-bois : Lichens, Myrtilles, Fougères.



Figure 8 : Forêts boréales (taïga) (Site 9)

2.1.4. Forêts de conifères montagnardes (Fig. 9)

- **Localisation** : Montagnes (Alpes, Rocheuses, Himalaya).
- **Adaptations** :
 - Formes résistantes au froid et au vent (port conique, aiguilles persistantes).
 - Espèces : Sapin, Cèdre, Genévrier.



Figure 9 : Forêts de conifères montagnardes (Site 10)

2.1.5. Forêts sèches et savanes boisées

- **Localisation** : Afrique subsaharienne, Australie, Amérique du Sud.
- **Caractéristiques** :
 - Végétation adaptée à la sécheresse (feuilles petites ou caduques).
 - Arbres dispersés (Baobab, Acacia) + herbes hautes.

2.2. Fonctions écologiques de la végétation forestière

- Production d'oxygène via la photosynthèse.
- Habitat pour la faune.

- Régulation du climat (stockage du CO₂).
- Protection des sols (lutte contre l'érosion).

2.3. Menaces

- Déforestation (agriculture, urbanisation).
- Changements climatiques (sécheresses, incendies).
- Espèces invasives.

La végétation forestière est un pilier de la biodiversité et des équilibres planétaires. Sa préservation est essentielle pour les générations futures.

3. La végétation pastorale (Fig. 10) :

3.1. Définition et étendue géographique

La végétation pastorale constitue un écosystème clé pour l'élevage mondial tout en fournissant d'importants services écosystémiques. La végétation pastorale désigne l'ensemble des formations végétales naturelles ou semi-naturelles utilisées pour le pâturage par les animaux domestiques et sauvages. Selon la classification de la **FAO (2020)**, ces écosystèmes couvrent environ 3,4 milliards d'hectares dans le monde, soit 26% des terres émergées.



Figure 10 : la végétation pastorale (Site 11)

Les cartes satellitaires **MODIS (2021)** révèlent leur répartition inégale :

- 40% en Afrique (savanes et steppes)
- 25% en Asie centrale (steppes arides)
- 20% en Amérique du Sud (pampas et cerrado)
- 15% dans les autres régions

3.2. Caractéristiques écologiques

3.2.1. Composition floristique et stratification

Les prairies naturelles présentent une organisation spatiale caractéristique. Les études phytoécologiques de **Coupland (1979)** et **White (1983)** identifient trois strates principales :

A. Strate herbacée (80-95% de couvert) :

- Graminées pérennes (*Festuca*, *Stipa*, *Poa*)
- Légumineuses (*Trifolium*, *Medicago*)
- Plantes à rosette (*Taraxacum*)

B. Strate arbustive (5-15%) :

- Ligneux bas (*Artemisia*, *Atriplex*)
- Jeunes arbres dispersés

C. Strate cryptogamique (Strate basse) : (lichens et mousses)

Les diagrammes de **Coupland (1992)** illustrent la distribution des types biologiques :

- 60-80% d'hémicryptophytes
- 15-30% de thérophytes
- 5-10% de chaméphytes

Les cartes de la **FAO (2021)** montrent que ces formations couvrent 25% des terres émergées, avec une productivité primaire nette variant de 2-10 t MS/ha/an selon le climat (**Sala et al., 1988**).

3.2.2. Adaptations morpho-physiologiques

Les recherches de **Briske (1996)** mettent en évidence des traits spécifiques :

- Systèmes racinaires profonds (jusqu'à 2 m)
- Croissance basitone (zones de croissance près de la base)
- Taux de repousse élevés (3-7 cycles/an)
- Résistance à la défoliation (méristèmes protégés)

3.3. Dynamique et productivité

3.3.1. Variations saisonnières

Les données phénologiques de **Hodgson (1990)** montrent :

- Production printanière : 60-70% de la biomasse annuelle
- Ralentissement estival : stress hydrique
- Repousse automnale (dans les climats tempérés)
- Dormance hivernale

3.3.2. Productivité primaire (Tab. 2)

Tableau 2: Les mesures de **Sala et al. (1988)** établissent des gradients :

Type	Production (t MS/ha/an)
Steppes arides	0,5-2
Prairies tempérées	3-6
Savanes	2-4
Pâturages alpins	1-3

3.4. Impacts du pâturage

3.4.1. Effets positifs

- Maintien de la biodiversité (**Milchunas et al., 1988**)
- Recyclage des nutriments (via les déjections)
- Contrôle des ligneux (par consommation des jeunes pousses)

3.4.2. Effets négatifs

- Surpâturage : réduction de 30-50% de la couverture (**UNEP, 2019**)
- Compactage des sols : augmentation de 20-40% de la densité apparente (**Greenwood et McKenzie, 2001**)
- Changement de composition floristique : augmentation des espèces non palatables

3.5. Enjeux de gestion durable

3.5.1. Pratiques recommandées

- Chargement animal adapté (0,5-1,5 UGB/ha selon le type)
- Rotation des parcelles (systèmes de pâturage tournant)
- Mise en défens temporaire (pour régénération)

3.5.2. Outils de suivi

- Indicateurs écologiques :

- Couvert végétal (>60% idéal)
- Hauteur moyenne (10-30 cm)
- Diversité spécifique

- Technologies modernes :

- Drones pour évaluation du couvert
- Capteurs IoT pour humidité du sol
- Images Sentinel-2 pour suivi NDVI

3.6. Services écosystémiques

1. Production fourragère (valeur économique globale : 500 milliards \$/an - **FAO 2021**)
2. Séquestration de carbone (0,5-2 t C/ha/an - IPCC 2019)
3. Régulation hydrique (infiltration améliorée de 20-40%)
4. Habitat pour la biodiversité (30% des espèces d'oiseaux nicheurs - BirdLife 2020)

La végétation pastorale représente un patrimoine écologique et économique vital nécessitant une gestion raisonnée. Les recherches récentes soulignent l'importance d'approches intégrées combinant savoirs traditionnels et technologies modernes pour concilier productivité et conservation. Son avenir dépendra largement de notre capacité à mettre en œuvre des pratiques pastorales durables face aux changements climatiques.

3. La végétation cultivée

La végétation cultivée (**Fig. 11**) désigne l'ensemble des plantes (céréales, légumes, arbres fruitiers, etc.) que l'Homme cultive pour son alimentation, son économie ou son environnement. Contrairement à la végétation naturelle, elle est gérée et modifiée par les pratiques agricoles, horticoles et sylvicoles (**Harlan, 1992 ; Mazoyer & Roudart, 2006**).



Figure. 11. La végétation cultivée

4.1. Classification de Végétation Cultivée

4.1.1. Cultures Vivrières (Alimentation humaine)

Les cultures vivrières constituent la base de l'alimentation humaine. Parmi elles, les **céréales** (blé, riz, maïs) fournissent plus de 50 % des calories mondiales. Les **légumineuses** (pois, lentilles) apportent des protéines végétales, tandis que les **tubercules** (pomme de terre, manioc) sont des sources d'énergie dans de nombreuses régions tropicales.

4.1.2. Cultures industrielles et de Rent

Ces plantes sont destinées à la transformation en produits non alimentaires. Le coton domine le secteur **textile**, tandis que le palmier à huile et le soja alimentent les **industries cosmétiques** et

agroalimentaires. Les plantes à sucre (betterave, canne) sont essentielles pour la production de biocarburants (**Bourgeois, 2019**).

4.1.3. Cultures Fourragères (Alimentation animale)

- **Fourrages** : Luzerne, trèfle, ray-grass.
- **Céréales fourragères** : Maïs ensilage, sorgho.

4.1.4. Horticulture Ornementale

- **Fleurs** : Roses, tulipes, orchidées.
- **Plantes d'intérieur** : Ficus, monstera, cactus.
- **Arbres d'ornement** : Tilleul, érable japonais.

4.1.5. Sylviculture (Arbres cultivés)

- **Bois d'œuvre** : Chêne, pin, eucalyptus.
- **Plantations fruitières** : Olivier, noyer, amandier.

4.2. Techniques Culturelles Modernes

A. Agriculture Intensive (conventionnelle)

L'utilisation d'engrais chimiques, de pesticides et de machines a permis d'augmenter les rendements, mais avec des conséquences environnementales (pollution des sols, perte de biodiversité).

B. Méthodes Alternatives

- **Agriculture biologique** : Exclusion des intrants synthétiques. Pas de produits synthétiques, rotation des cultures

- **Agroforesterie** : Association d'arbres et de cultures (ex : cacaoyers sous ombrage, café sous ombrage).
- **Hydroponie/ Aéroponie** : Culture hors-sol, en milieu contrôlé (Altieri, 2018).

4.3. Enjeux et Défis

A. Sécurité alimentaire : Nourrir une population croissante.

B. Défis Environnementaux

- Dégradation des sols : Érosion, appauvrissement en nutriments
- Ressources en eau : Irrigation intensive (ex : riziculture en Asie).
- Changement climatique : Adaptation des cultures (variétés résistantes à la sécheresse).

C. Innovations Durables

- Agriculture durable : Permaculture, agroécologie.
- OGM résistants : Maïs tolérant à la sécheresse.
- Permaculture : Conception éco-responsable des systèmes agricoles (**Gliessman, 2015**).

La végétation cultivée est essentielle pour l'humanité, elle évolue face aux défis climatiques et démographiques. Son exploitation intensive pose des défis environnementaux. Les pratiques durables (agroécologie, circuits courts) sont cruciales pour l'avenir.

Chapitre 2 : Les pratiques culturelles en tant que moyen de conservation des sols cultivés

Chapitre 2 : Les pratiques culturales en tant que moyen de conservation des sols cultivés

5. Les pratiques culturales un moyen de conservation des sols cultivés

Les pratiques culturales jouent un rôle essentiel dans la conservation des sols cultivés en prévenant l'érosion, en améliorant la structure du sol et en maintenant sa fertilité. Ces techniques visent à optimiser l'utilisation des terres agricoles tout en minimisant leur dégradation. Parmi les principales pratiques figurent le travail réduit du sol, la rotation des cultures, les cultures de couverture et l'agroforesterie....etc.

1.1. Travail réduit du sol et semis direct

Le labour intensif peut accélérer l'érosion éolienne et hydrique en exposant la couche superficielle du sol. Le semis direct (sans labour) et les techniques de travail minimal du sol permettent de préserver la structure du sol, de maintenir la matière organique et de réduire la perte de nutriments (**Derpsch et al., 2010**). Ces méthodes favorisent également l'activité biologique du sol, notamment celle des vers de terre, qui améliorent l'aération et l'infiltration de l'eau (**Fig. 12**).



Figure 12 : Semis direct sous couvert végétal (Site 12)

1.2. Rotation des cultures et diversification

La monoculture épuise les nutriments du sol et augmente les risques de maladies. La rotation des cultures (alternance de céréales, légumineuses et plantes à racines profondes) améliore la fertilité du sol en fixant l'azote et en brisant les cycles des parasites (**Kassam et al., 2013**).

Par exemple, l'introduction de légumineuses comme le trèfle ou la luzerne enrichit le sol en azote grâce à la symbiose avec les bactéries *Rhizobium* (Fig. 13).

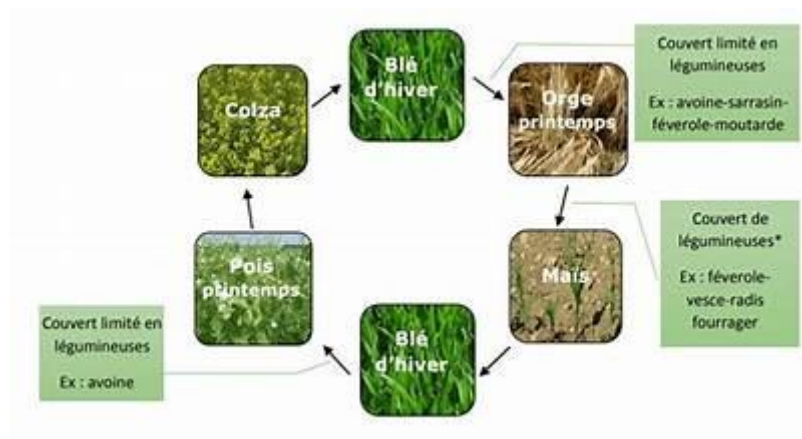


Figure 13 : Exemple de Rotation des cultures (Site 13)

1.3. Cultures de couverture et paillage

Les cultures de couverture (comme le seigle, le radis fourrager ou le trèfle) protègent le sol entre deux cultures principales. Elles réduisent l'érosion, améliorent la rétention d'eau et limitent la croissance des mauvaises herbes (Blanco-Canqui *et al.*, 2015). Le paillage (utilisation de résidus végétaux ou de paille) diminue également l'évaporation et maintient une température stable dans le sol.

1.4. Agroforesterie et bandes enherbées

L'agroforesterie associe arbres et cultures pour une meilleure gestion des sols. Les arbres fixent le sol grâce à leurs racines, fournissent de l'humus via la décomposition des feuilles et créent des microclimats favorables (Jose, 2009). Les bandes enherbées en bordure des champs filtrent les ruissellements et réduisent la pollution des cours d'eau (Fig. 14).



Figure 14 : Système agroforestier avec des cultures (Site 14)

Les pratiques culturales durables sont indispensables pour préserver la qualité des sols cultivés. En combinant travail réduit du sol, rotations, couvertures végétales et agroforesterie, les agriculteurs peuvent lutter contre l'érosion, améliorer la biodiversité et assurer une production à long terme.

6. Relation entre l'addition de matières organiques et la conservation des sols

L'addition de matières organiques (MO) constitue une pratique agroécologique fondamentale pour la conservation des sols agricoles. Cette addition de la MO est une pratique essentielle pour améliorer la qualité et la durabilité des sols cultivés. Cette relation synergique repose sur plusieurs mécanismes interdépendants qui améliorent simultanément la qualité physique, chimique et biologique des sols. Elle joue un rôle clé dans la fertilité du sol, la stabilité structurale, la rétention d'eau et la réduction de l'érosion. Les matières organiques proviennent de diverses sources, telles que les composts, les fumiers, les résidus de cultures et les engrais verts. Leur incorporation dans le sol stimule l'activité biologique et favorise la formation d'humus, un composé stable qui améliore les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol.

6.1. Amélioration de la structure et stabilité du sol

Les matières organiques agissent comme un ciment naturel, favorisant la formation d'agrégats stables par l'intermédiaire des polysaccharides microbiens et des complexes organo-minéraux

(Six *et al.*, 2004). Cette agrégation réduit considérablement la sensibilité du sol à l'érosion hydrique et éolienne. Les sols enrichis en matière organique présentent une porosité accrue (jusqu'à 30% d'augmentation selon **Blanco-Canqui & Lal, 2008**), améliorant ainsi l'infiltration de l'eau et réduisant le ruissellement de surface.

Cette amélioration de la structure réduit les risques de compactage et d'érosion hydrique ou éolienne (**Bronick & Lal, 2005**). Un sol riche en MO résiste mieux aux pluies intenses, car les agrégats limitent la formation d'une croûte de battance. De plus, la MO augmente la porosité du sol, facilitant l'infiltration de l'eau et réduisant le ruissellement.

2.2. Amélioration de la fertilité et de la rétention des nutriments

La décomposition des matières organiques libère des nutriments essentiels (azote, phosphore, potassium) sous une forme progressivement disponible pour les plantes (**Stevenson, 1994**). La matière organique sert de réservoir nutritif, libérant progressivement N, P, S et micronutriments par minéralisation. Selon Stevenson (**1994**), 1% de matière organique supplémentaire peut fournir 20-30 kg d'azote/ha/an. La capacité d'échange cationique (CEC) est augmentée de 2 à 5 fois dans les sols riches en matière organique (**Brady & Weil, 2008**), réduisant ainsi les pertes par lessivage. Les composés humiques ont également une capacité d'échange cationique (CEC) élevée, ce qui permet de retenir les ions nutritifs et de limiter leur lessivage. Par exemple, l'apport de compost ou de fumier augmente la disponibilité de l'azote, réduisant ainsi le besoin en engrais minéraux (**Fig.15**).



Figure 15 : Cycle de la matière organique dans le sol et libération des nutriments (**Site 15**).

2.3. Stimulation (activation) de l'activité biologique

L'apport organique stimule l'activité microbienne (jusqu'à 10 fois plus importante selon **Insam (2001)** et la macrofaune du sol. Les vers de terre, dont la population peut augmenter de 300% (**Edwards & Bohlen, 1996**), améliorent la structure du sol par leurs galeries et leurs turricules. Cette activité biologique accélère la formation d'humus stable.

Les microorganismes (bactéries, champignons) et la macrofaune (vers de terre, collemboles) dépendent de la matière organique comme source d'énergie. Une augmentation de la MO favorise la biodiversité du sol, accélère la décomposition des résidus et améliore la formation d'humus (**Lavelle et al., 2006**). Les vers de terre, en particulier, contribuent à l'aération du sol et à la création de galeries, ce qui améliore la circulation de l'eau et des racines.

2.4. Réduction de l'érosion et adaptation aux changements climatiques

Les sols enrichis en MO ont une meilleure résilience face à la sécheresse grâce à leur capacité accrue de rétention d'eau. De plus, les résidus organiques en surface (paillage) protègent le sol contre l'impact des gouttes de pluie, principale cause de l'érosion (**Lal, 2020**). Dans les régions arides, l'ajout de MO permet également de séquestrer du carbone, contribuant ainsi à atténuer les émissions de CO₂.

2.5. Optimisation des propriétés hydriques

L'incorporation de matière organique augmente la capacité de rétention en eau du sol de 20 à 40% (**Hudson, 1994**). Cette propriété est particulièrement cruciale en contexte de changement climatique, permettant aux sols de mieux résister aux épisodes de sécheresse. Les résidus organiques en surface (paillage) réduisent également l'évaporation de l'eau du sol de 30 à 50% (**Unger et al., 1991**).

2.6. Séquestration du carbone et atténuation climatique

Les pratiques de gestion organique permettent de séquestrer 0,1 à 1 tonne de C/ha/an (**Lal, 2004**), contribuant ainsi à l'atténuation des GES. Les systèmes avec apports organiques réguliers montrent une augmentation du stock de carbone de 10 à 30% sur 10 ans (**West & Post, 2002**).

Applications pratiques recommandées :

- Apports de compost (10-20 t/ha tous les 3-5 ans)
- Incorporation de cultures de couverture (3-5 t MS/ha/an)
- Paillage avec résidus végétaux (couverture > 30% du sol)
- Rotation avec légumineuses (fixation biologique d'azote)

L'incorporation de matières organiques est une stratégie clé pour la conservation des sols. Elle améliore leur structure, leur fertilité et leur résistance à l'érosion, tout en soutenant la biodiversité et en atténuant les effets des changements climatiques. Les pratiques telles que le compostage, l'épandage de fumier et l'utilisation de cultures de couverture doivent être encouragées pour une agriculture durable. L'addition raisonnée de MO représente une stratégie multifonctionnelle de conservation des sols, combinant amélioration de la productivité agricole et protection de l'environnement. Son efficacité dépend cependant de la régularité des apports et de leur adaptation aux conditions pédoclimatiques locales.

7. Amélioration et stabilisation de la structure par addition de matières organiques

L'addition de matières organiques (MO) représente une solution agroécologique majeure pour améliorer durablement la structure des sols agricoles. Par des processus à la fois physiques, chimiques et biologiques, la MO transforme la microstructure du sol, augmentant sa résistance aux contraintes mécaniques et climatiques (**Bronick & Lal, 2005**). Cette amélioration structurale est particulièrement cruciale dans les sols dégradés ou sensibles à l'érosion.

3.1. Mécanismes d'amélioration structurale

La matière organique agit comme un agent de cohésion à travers trois mécanismes complémentaires :

a) Encollage particulaire

Les polymères organiques (glomaline, polysaccharides microbiens) enrobent les particules minérales, formant des ponts moléculaires. Ces substances colloïdales, particulièrement les

acides humiques, créent des complexes argilo-humiques stables (**Six et al., 2004**). Des études en microscopie électronique ont montré que ces liaisons peuvent doubler la cohésion des agrégats.

b) Structuration biologique

La macrofaune du sol, notamment les vers de terre (*Lumbricus terrestris*), ingère et mélange la MO avec les particules minérales, excréant des turricules riches en mucus. Ces structures cylindriques présentent une stabilité remarquable, avec des taux de dispersion dans l'eau inférieurs à 10% (**Edwards & Bohlen, 1996**). Un seul ver de terre peut produire 4-10 kg de turricules par an.

c) Réseau mycélien

Les hyphes fongiques (en particulier les mycorhizes) forment un véritable "squelette organique" enchevêtrant les agrégats. **Tisdall & Oades (1982)** ont démontré que ce réseau peut augmenter la résistance à la rupture des agrégats de 30-50%.

3.2. Impacts mesurables sur les propriétés physiques

L'enrichissement en MO modifie fondamentalement les caractéristiques structurales :

a) Porosité

L'analyse tomographique révèle que les sols amendés présentent :

- +20-35% de macroporosité (>30µm)
- Une meilleure connectivité des pores
- Un doublement de la porosité biologique (galeries)

b) Stabilité des agrégats

Le test de stabilité à l'eau (méthode Yoder) montre :

- Indice de stabilité moyen : 0,45 (sans MO) → 0,75 (avec 5% MO)
- Réduction de 60% de la dispersion des argiles

c) Résistance mécanique

Des essais au pénétromètre indiquent :

- Réduction de 25-40% de la résistance à la pénétration
- Limite de liquidité augmentée de 15-20 points

3.3. Facteurs d'efficacité

L'impact structural dépend de plusieurs paramètres :

a) Qualité de la MO

- Rapport C/N optimal : 15-25
- Degré d'humification : MO bien décomposée > résidus frais
- Teneur en lignine : influence la durabilité des effets

b) Conditions pédoclimatiques

- Effet maximal en sols argileux (30-50% d'argile)
- Humidité > 60% de la capacité au champ optimise les processus
- Température idéale : 15-25°C pour l'activité biologique

3.4. Applications pratiques

Pour une optimisation des résultats :

a) Méthodes d'apport

- Incorporation superficielle (0-20 cm)
- Fractionnement des apports (2-3 applications/an)
- Combinaison avec couvert végétal

b) Doses recommandées

Tableau 3 : Doses recommandées selon le type de sol (Baize, 2000)

Type de sol	Dose annuelle (t MS/ha)	Fréquence
Sols sableux	8-12	Annuelle
Sols limoneux	5-8	Tous les 2 ans
Sols argileux	3-5	Tous les 3 ans

c) Synergies culturales

- Rotation avec légumineuses (*Trifolium* spp.)
- Techniques sans labour
- Paillage organique permanent

3.5. Perspectives innovantes

Les recherches récentes explorent :

- L'utilisation de biochars comme amendement structurant
- L'optimisation des communautés microbiennes
- Les indicateurs moléculaires de stabilité structurale

Cette amélioration structurale durable permet de :

- ✓ Réduire l'érosion hydrique de 60-80%
- ✓ Augmenter l'infiltration de 30-50%
- ✓ Améliorer la portance des sols
- ✓ Faciliter le développement racinaire

8. Le travail du sol

Le travail du sol est une analyse approfondie des techniques et de leur impact sur la conservation des sols. C'est une pratique agricole fondamentale visant à préparer le lit de semence, gérer les résidus culturaux et améliorer les propriétés physiques du sol. Lorsqu'il est bien maîtrisé, il contribue à la conservation des sols en limitant l'érosion, en améliorant l'infiltration de l'eau et en favorisant l'activité biologique (**Lal, 2020**). Cependant, son efficacité dépend du type de travail, de la fréquence et des conditions pédoclimatiques.

8.1. Objectifs du travail du sol

Le travail du sol englobe l'ensemble des interventions mécaniques visant à modifier l'état physique du sol pour le préparer à la culture. Ses principaux objectifs sont :

- Préparation du lit de semence (aération, réchauffement)
- Gestion des résidus végétaux
- Contrôle des adventices
- Amélioration de l'infiltration hydrique
- Incorporation des amendements

8.2. Rôle du travail du sol dans la conservation des sols

a) Réduction de l'érosion

- Labour en billons : Crée des micro-reliefs qui ralentissent le ruissellement (**Morgan, 2005**).
- Travail superficiel : Maintient une couverture partielle du sol pour limiter l'impact des pluies.
- Techniques anti-érosives (ex : travail suivant les courbes de niveau) réduisent l'érosion hydrique de 30 à 50% (**Derpsch et al., 2010**).

b) Amélioration de l'infiltration et de la rétention d'eau

- Décompactage : Le sous-solage améliore la porosité en profondeur, favorisant l'enracinement et le drainage (**Pagliai et al., 2004**).

- Travail en bandes (strip-till) : Perturbe seulement la ligne de semis, conservant une structure stable entre les rangs.

c) Gestion des résidus et contrôle des adventices

-Incorporation des résidus : Accélère leur décomposition et réduit les maladies (**Kassam et al., 2013**).

- Travail superficiel (hersage) : Détruit les mauvaises herbes sans perturber excessivement le sol.

4.3. Techniques alternatives de travail du sol pour une meilleure conservation

On distingue les catégories :

a) Travail Conventionnel (Labour)

- Profondeur : 20-30 cm
- Outils : Charrue à socs ou à disques
- Avantages : Bonne incorporation des résidus
- Inconvénients : Dégradation structurale accélérée

b) Techniques Culturales Simplifiées (TCS)

- Outils : Décompacteurs, cultivateurs à dents
- Économie énergétique : 25-30%
- Réduction de la profondeur (10-15 cm au lieu de 25-30 cm).
- Utilisation d'outils à dents (décompacteurs) plutôt qu'à socs.

c) Semis Direct

- Perturbation minimale (<5 cm)
- Outils spéciaux : Semoirs à disques
- Avantage majeur : Conservation maximale de la structure
- Aucun travail du sol, les graines sont placées directement dans les résidus.
- Réduction de l'érosion (-70%) (**Derpsch et al., 2010**).
- Meilleure activité biologique (vers de terre +300%) (**Edwards & Bohlen, 1996**).

c) Travail en planches permanentes

- Seule la zone de semis est travaillée chaque année, le reste reste intact.
- Réduction du tassement.
- Économie de carburant (**-30%) (Soane *et al.*, 2012)

4.4. Impact du travail du sol sur les propriétés physico-chimiques du sol

a) Effets Positifs :

- Augmentation de la macroporosité (+15-25%)
- Meilleure infiltration (jusqu'à 50% d'amélioration)
- Réchauffement plus rapide au printemps

b) Effets Négatifs d'un travail du sol excessif

- Risque de compaction (passage d'engins) : Le passage répété d'engins lourds tasse les horizons profonds.
- Minéralisation accélérée de la MO (jusqu'à 30% de perte) : Réduit la fertilité à long terme (Lal, 2020).
- Formation possible de semelle de labour
- Dégradation de la structure : Le labour intensif peut détruire les agrégats et favoriser la formation d'une croûte de battance (Six *et al.*, 2004).

4.5. Travail du sol et biodiversité

L'impact sur la vie du sol varie considérablement (Tab. 16) :

Tableau 4 : L'impact du travail du sol sur la vie du sol (Site 16)

Organisme	Labour Intensif	TCS	Semis Direct
Vers de terre	-70%	-30%	+50%
Mycorhizes	-80%	-40%	+100%
Microarthropodes	-60%	-20%	+40%

4.6. Innovations Récentes

- Agriculture de Précision : Guidage GPS pour éviter le surcroisement
- Outils Intelligents : Capteurs mesurant la résistance du sol en temps réel
- Robotique Agricole : Machines légères autonomes

4.7. Recommandations pour une pratique durable

- Adapter la profondeur à la texture du sol
- Travailler à l'optimum hydrique (ni trop sec, ni trop humide)
- Alternier les outils (dents/socs/disques)
- Combiner avec des couverts végétaux (**Tab. 5**).

Tableau 5 : Comparaison des différentes techniques de travail du sol (INRAE, 2020).

Pratique	Avantages	Limites
Labour occasionnel (tous les 3-5 ans)	Aération profonde	Perturbation biologique
Travail réduit (10-15 cm)	Économie d'énergie	Gestion des adventices
Semis direct	Meilleure conservation	Nécessite herbicides

Le choix des techniques de travail du sol doit résulter d'un compromis éclairé entre :

- ✓ Besoins culturaux immédiats
- ✓ Préservation à long terme
- ✓ Contraintes économiques
- ✓ Contexte pédoclimatique

Le travail du sol, s'il est bien adapté au contexte local, peut être un outil efficace de conservation des sols. Les techniques réduites (TCS) et le semis direct offrent des compromis intéressants entre productivité et durabilité. L'avenir de l'agriculture conservatrice repose sur une combinaison intelligente du travail du sol avec d'autres pratiques (couverts végétaux, rotation).

5. La rotation des cultures

5.1. Définition et principes de base

La rotation des cultures est une pratique agronomique ancestrale qui consiste à alterner différentes espèces végétales sur une même parcelle selon un cycle planifié. Reconnue comme un pilier de l'agriculture durable, elle joue un rôle clé dans la conservation des sols en améliorant leur structure, leur fertilité et leur résilience face aux aléas climatiques (**Kassam *et al.*, 2019**). Face aux défis actuels de dégradation des terres, cette pratique offre des solutions à la fois économiques et écologiques.

5.2. Conception d'une rotation conservatrice

La rotation culturale est une succession planifiée de différentes espèces végétales sur une même parcelle au cours des saisons. Cette pratique millénaire repose sur trois **principes agronomiques fondamentaux** :

- a. Alternance des familles botaniques : éviter céréale après céréale ; ex : céréales → légumineuses → crucifères)
- b. Variation des systèmes racinaires (profondeur, densité)
- c. Modulation des besoins nutritifs (plantes exigeantes vs améliorantes)
- d. Intégrer des plantes améliorantes (légumineuses, engrais verts)
- e. Adapter aux contraintes locales (sol, climat, marché)

Tableau 6 : Exemple de Rotation des cultures et Analyse des impacts sur le sol pour chaque culture (**Arvalis, 2021**).

Année	Culture	Bénéfice Sol
1	Blé + trèfle sous-semis	Structure, azote
2	Pomme de terre	Aération profonde
3	Luzerne	Humus, lutte adventices
4	Tournesol	Desserrement, horizon compact

5.3. Mécanismes de conservation des sols par la rotation

a) Amélioration de la Structure du Sol

- Variation des systèmes racinaires : L'alternance entre plantes à racines pivotantes (ex : luzerne) et fasciculées (ex : céréales) crée un réseau poreux stable, réduisant les risques de compactage (**Bronick & Lal, 2005**).

- Stimulation de l'activité biologique : Les légumineuses (pois, trèfle) favorisent la vie microbienne, augmentant la formation d'agrégats (+30% de stabilité selon **Six et al., 2004**).

b) Gestion de la Fertilité

- Fixation naturelle d'azote : Les légumineuses en symbiose avec *Rhizobium* peuvent restituer 50-200 kg N/ha/an (**Crews & Peoples, 2004**).

- Recyclage des nutriments : Les cultures profondes (tournesol) remontent le phosphore et le potassium des couches inférieures.

c) Lutte contre l'Érosion

- Couverture permanente : L'enchaînement de cultures à cycles courts et de couverts végétaux réduit l'exposition du sol aux agents érosifs (**Morgan, 2005**).

- Effet tampon : Les résidus variés forment un mulch protecteur, diminuant l'érosion hydrique jusqu'à 60% (**Derpsch et al., 2014**).

5.4. Impacts Agronomiques Majeurs

a) Gestion de la fertilité du sol

- Légumineuses (pois, luzerne) : Fixation symbiotique d'azote (50-200 kg N/ha/an)

- Plantes à enracinement profond (tournesol) : Remontée des nutriments

- Effet précédent cultural : Un bon précédent peut augmenter le rendement de 15-30%

b) Régulation des Bioagresseurs

- Rupture des cycles des pathogènes spécifiques
- Réduction des adventices par variation des dates de semis
- Diminution des nématodes grâce aux plantes pièges

5.5. Conception d'une rotation optimale

Critères de conception :

- Équilibre économique (cultures rentables)
- Compatibilité technique (matériel disponible)
- Adaptation pédoclimatique
- Durée du cycle (3 à 7 ans idéalement)

Exemple de rotation performante :

1. Blé d'hiver
2. Pois protéagineux
3. Orge de printemps + couvert végétal
4. Colza

5.6. Bénéfices Environnementaux

- Réduction des intrants : -20 à 30% d'engrais minéraux
- Séquestration carbone : +0,5 à 1 t C/ha/an
- Préservation de la biodiversité : +40% d'auxiliaires
- Économie d'eau : Meilleure infiltration (+25%)

5.7. Innovations et adaptations modernes :

- Rotations avec CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates)
- Introduction de nouvelles espèces (lentilles, chanvre)
- Outils d'aide à la décision (logiciels de planification)
- Agriculture de précision : adaptation intra-parcellaire

5.8. Étude de Cas : Rotation Bioéconomique

Système testé en Bretagne (INAO, 2022) :

- Année 1 : Froment + trèfle sous-semis
- Année 2 : Pomme de terre
- Année 3 : Sarrasin
- Année 4 : Légumes de plein champ

Résultats après 5 cycles :

- ✓ Rendement stabilisé (+12%)
- ✓ Indice de santé des sols : +35%
- ✓ Marge brute : +18%

La rotation culturale représente l'outil le plus puissant pour concilier :

- ✓ Productivité économique
- ✓ Résilience agroécologique
- ✓ Durabilité environnementale

6. Le Mulching

6.1. Définition et principes du Mulching

Le mulching, ou paillage, est une technique agricole consistant à recouvrir le sol avec des matériaux organiques ou synthétiques pour le protéger et améliorer ses propriétés. Cette pratique vise à réduire l'érosion, maintenir l'humidité, réguler la température du sol et limiter la croissance des adventices (**FAO, 2019**). Les paillis peuvent être constitués de résidus de cultures (paille, feuilles), de compost, de plastiques biodégradables ou de films synthétiques.

Cette pratique agit comme :

- Barrière physique contre l'érosion
- Régulateur thermique et hydrique
- Source de matière organique

6.2. Avantages du Mulching pour la Conservation des Sols

- **Réduction de l'érosion** : Le paillage protège le sol contre l'impact des gouttes de pluie et le vent, limitant ainsi la perte de terre arable (**Lal, 2020**). Réduction de 70-90% de l'érosion hydrique (**Morgan, 2005**), protection contre le vent (jusqu'à 50% de pertes en moins).
- **Amélioration de l'infiltration de l'eau** : En évitant la formation d'une croûte de battance, le mulching favorise la pénétration de l'eau dans le sol (**Kader et al., 2017**).
- **Régulation thermique** : Le paillage maintient une température stable, protégeant les racines des variations extrêmes (**Moreno & Moreno, 2008**).
- **Enrichissement en matière organique** : Les paillis organiques se décomposent progressivement, améliorant la fertilité du sol (**Magdoff & Van Es, 2021**).
- **Amélioration des propriétés physico-chimiques**
 - Température stabilisée ($\pm 5^{\circ}\text{C}$ vs sol nu)
 - Humidité maintenue (+30% de rétention)

- pH stabilisé par effet tampon

-Stimulation de la Vie Biologique

- Multiplication des vers de terre (+300%)

- Activité microbienne accrue

6.3 .Types de Mulching et leurs applications

-Paillis organiques : Paille, copeaux de bois, tonte de gazon (idéal pour les cultures maraîchères).

-Paillis plastiques : Films noirs ou transparents utilisés en horticulture pour contrôler les mauvaises herbes.

-Paillis vivants : Plantes couvre-sol (trèfle, luzerne) entre les rangs de culture (**Tab. 7**).

Tableau 7 : Comparaison des différents types de Mulching (**INRAE, 2020 ; ADEME, 2021 ; FAO, 2017**).

Type	Avantages	Inconvénients	Durée
Paille	Économique, bonne isolation	Risque de vol	6-12 mois
Tonte de gazon	Richesse en N	Tassement possible	2-4 mois
Bois raméal	Apport lignine durable	C/N élevé	12-24 mois
Plastique noir	Réchauffement rapide	Pollution potentielle	1 saison

6.4. Limites et Précautions

- Certains paillis (comme la paille non compostée) peuvent temporairement immobiliser l'azote du sol (**Sullivan, 2003**).

- Les films plastiques, bien qu'efficaces, posent des problèmes de pollution s'ils ne sont pas biodégradables.

Le mulching est une méthode efficace pour préserver la santé des sols cultivés, combinant avantages agronomiques et environnementaux. Son adoption à grande échelle pourrait contribuer à une agriculture plus durable.

6.5. Techniques de Mise en Œuvre

- Épaisseur optimale : 5-10 cm (organique)
- Période idéale : Après pluie, sur sol réchauffé
- Préparation : Désherbage et léger griffage

Cas particuliers :

- Vergers : Broyat d'élague en couronne
- Maraîchage : Paillage plastique biodégradable
- Grandes cultures : Résidus de récolte laissés sur place

6. 6. Innovations Récentes

- Mulching biodégradables à base d'amidon
- Paillis enzymatiques à décomposition contrôlée
- Couches superposées (carton + paille)
- Robotique pour paillage précis

6.7. Étude de cas : Impact à long terme

Essai INRAE (2015-2022) :

- Parcelle témoin (sans paillis) : Taux de MO = 1.2%
- Parcelle paillée (paille+tontes) : Taux de MO = 2.8%

- Résultats :

- Infiltration +45%

- Rendement +18%
- Économie d'eau 30%

Le mulching est la technique la plus polyvalente pour :

- ✓ Protéger instantanément le sol
- ✓ Améliorer progressivement sa fertilité
- ✓ Réduire l'empreinte environnementale

Chapitre 3 : Les procédés spéciaux de conservation des sols

Chapitre 3 : Les procédés spéciaux de conservation des sols

1. Les procédés spéciaux de conservation des sols

La conservation des sols est essentielle pour maintenir la productivité agricole, prévenir la dégradation des terres et lutter contre les changements climatiques. Outre les techniques classiques comme le mulching, plusieurs procédés spéciaux ont été développés pour répondre à des conditions spécifiques ou des défis particuliers.

1.1. Les techniques de conservation adaptées aux pentes (Anti-érosives)

a) Les terrasses agricoles (Fig. 16)

- **Principe** : Aménagement de paliers horizontaux sur les versants pour réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et limiter l'érosion.

- **Applications** : Utilisées depuis des millénaires (ex. : rizières en Asie, cultures andines).

- **Avantages** :

- Réduction de l'érosion hydrique jusqu'à 90% (FAO, 2021).

- Meilleure rétention de l'eau et des nutriments.

- Limites : Coût élevé en main-d'œuvre et entretien nécessaire.



Figure 16 : Terrasses en gradins (Site 17)

b) Les bandes enherbées ou végétalisées

- **Principe** : Alternance de cultures et de bandes de végétation permanente (herbes, arbustes) pour freiner le ruissellement.
- Efficacité : Réduction de 50-70% de l'érosion (USDA, 2020).
- Exemple : Système de "strip cropping" aux États-Unis.

1.2. Les techniques de régénération des sols dégradés

a) La Biochar (Charbon de Bois Agricole)

- **Principe** : Incorporation de charbon produit par pyrolyse de biomasse pour améliorer la rétention d'eau et la fertilité.
- **Avantages** :
 - Séquestration du carbone (potentiel climatique).
 - Augmentation de la CEC (capacité d'échange cationique) (**Lehmann & Joseph, 2015**).
- Limites : Coût de production et disponibilité de la biomasse.

b) La phytoremédiation

- **Principe** : Utilisation de plantes (ex. : tournesol, saule) pour extraire les polluants (métaux lourds) du sol.
- **Applications** : Réhabilitation des sols industriels contaminés (**EPA, 2019**).

1.3. Les innovations en agroforesterie

a) Les systèmes agroforestiers

- **Principe** : Intégration d'arbres dans les cultures ou pâturages.
- **Avantages** :
 - Réduction de l'érosion par le système racinaire.

- Amélioration de la biodiversité (ICRAF, 2022).

- **Exemple** : Cultures sous ombrage (café, cacao).

b) Le "Push-Pull" (Agriculture de Contrôle Biologique)

- **Principe** : Combinaison de plantes répulsives et attractives pour limiter les ravageurs et améliorer le sol.

- **Exemple** : Utilisation de Desmodium (repousse les nématodes) et Napier (attire les insectes).

1.4. Les méthodes mécaniques avancées

a) Le non-labour avec couverture végétale permanente

- **Principe** : Suppression du labour pour préserver la structure du sol, combinée à des plantes de couverture.

- **Avantages** :

- Moins de compaction et meilleure activité microbienne.

- Stockage accru de carbone (Lal, 2018).

b) Les structures en géotextiles

- **Principe** : Utilisation de toiles biodégradables (fibres de coco, jute) pour stabiliser les sols en pente.

- **Applications** : Réhabilitation de terrains érodés (construction routière, berges).

Les procédés spéciaux de conservation des sols offrent des solutions ciblées pour des défis spécifiques (érosion forte, pollution, sécheresse). Leur efficacité dépend du contexte pédoclimatique et des ressources disponibles. Une combinaison de plusieurs techniques (ex. : terrasses + agroforesterie) est souvent la meilleure approche.

2. L'équation universelle de perte des sols de Wischmeier et Smith (USLE/RUSLE) :

2.1. Présentation de l'équation

L'équation universelle de perte des sols (USLE, Universal Soil Loss Equation), développée par **Wischmeier et Smith (1965, 1978)**, est un modèle empirique permettant d'estimer l'érosion hydrique des sols. Elle a été révisée (RUSLE, Revised USLE) pour améliorer sa précision. L'équation s'exprime comme suit :

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

Où :

- **A** : Perte annuelle moyenne de sol (tonnes/hectare/an).
- **R** : Facteur d'érosivité des précipitations (énergie des pluies).
- **K** : Facteur d'érodibilité du sol (sensibilité à l'érosion).
- **LS** : Facteur topographique (longueur et inclinaison de la pente).
- **C** : Facteur de gestion des cultures (couverture végétale).
- **P** : Facteur des pratiques de conservation (mesures anti-érosives).

Cette équation est largement utilisée en agronomie, en aménagement du territoire et dans les études environnementales pour évaluer les risques d'érosion et planifier des mesures de conservation.

2.2. Détail des facteurs :

a) Facteur R : Érosivité des précipitations

Il mesure l'impact des précipitations sur l'érosion. Le facteur **R** quantifie l'impact des pluies sur l'érosion. Il dépend de l'énergie cinétique des gouttes et de leur intensité. **Wischmeier et Smith (1978)** proposent de le calculer en cumulant les produits de l'énergie des pluies (**E**) et de l'intensité maximale en 30 minutes (**I₃₀**) pour chaque événement pluvieux.

Des cartes mondiales et régionales de l'érosivité des pluies ont été établies, comme celles de **Panagos et al. (2017)** pour l'Europe, montrant des valeurs élevées en zones tropicales et montagneuses. Ces cartes permettent d'estimer R sans mesures locales, en se basant sur des données climatiques.

Il se calcule à partir de l'énergie cinétique des pluies et de leur intensité maximale sur 30 minutes selon la formule simplifiée (**Wischmeier & Smith, 1978**) :

$$R = \sum_{i=1}^n (E \cdot I_{30})$$

où

E = énergie cinétique (MJ/ha) et I_{30} = intensité maximale sur 30 minutes (mm/h).

b) Facteur K : Érodibilité du sol

Le facteur **K** reflète la sensibilité du sol à l'érosion. Il dépend de :

- La texture (les sols limoneux sont les plus érodibles).
- La teneur en matière organique (qui stabilise le sol).
- La structure et la perméabilité.

Des tables de valeurs de K ont été publiées dans l'USDA Handbook 537 (**Wischmeier & Smith, 1978**). Par exemple, un sol sableux a un $K \approx 0,02-0,05$, tandis qu'un sol argileux peut atteindre 0,15. Des méthodes de laboratoire (simulateurs de pluie) et des modèles mathématiques (comme l'équation nomographique) sont utilisés pour le déterminer.

c) Facteur LS : Influence de la topographie

Le facteur **LS** combine l'effet de la longueur (**L**) et de la pente (**S**). Plus une parcelle est longue et pentue, plus l'érosion est importante. **McCool et al. (1987)** ont affiné son calcul pour les fortes pentes ($> 20\%$) :

$$LS = (\lambda / 22,1)^m \times (\sin \theta / 0,0896)^n$$

où λ = longueur de pente (m), θ = angle de pente, et m, n = coefficients variables.

Des outils comme les SIG (Systèmes d'Information Géographique) permettent de calculer LS à partir de modèles numériques de terrain (MNT).

d) Facteurs C et P : Gestion des terres

- **Facteur de culture (C)** : Il représente l'effet protecteur de la végétation. Variabilité selon le type de végétation et les rotations culturales.

Par exemple :

- $C = 1,0$ pour un sol nu.
- $C = 0,01$ pour une forêt dense.

Des études comme celles de Renard et al. (1997) fournissent des valeurs pour différentes cultures et rotations.

- **Facteur P : Facteur de pratiques anti-érosives (P)**: Il intègre les pratiques réduisant l'érosion (labour en courbes de niveau, terrasses). Réduction de l'érosion par des techniques comme les terrasses ou le labour suivant les courbes de niveau.

Par exemple :

- $P = 0,25$ pour des terrasses bien conçues.
- $P = 1,0$ si aucune mesure n'est appliquée.

Applications et limites

La RUSLE est utilisée pour :

- Évaluer l'impact des changements climatiques sur l'érosion (**Panagos et al., 2022**).
- Planifier des aménagements anti-érosifs (bandes enherbées, agroforesterie).

Limites :

- Ne prend pas en compte l'érosion en ravines ou les glissements de terrain.
- Requiert des données locales précises pour être fiable.

2.3. Objectif de l'équation de Wischmeier (USLE/RUSLE) : Pourquoi la calcule-t-on ?

L'équation universelle de perte des sols (USLE) et sa version révisée (RUSLE) ont été développées pour quantifier et prédire l'érosion hydrique des sols dans différents contextes agricoles, forestiers et environnementaux. Voici **ses principaux objectifs** :

2.3.1. Évaluer les risques d'érosion des sols

L'équation permet de calculer la quantité de sol perdue chaque année sous l'effet des pluies et du ruissellement. Cela aide à :

- Identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion (parcelles en pente, sols fragiles).
- Comparer l'impact de différents types d'utilisation des terres (cultures, forêts, pâturages).

Exemple : Un agriculteur peut estimer si son champ perd 5 ou 50 tonnes de sol par hectare/an, ce qui influence ses pratiques culturales.

2.3.2. Guider les pratiques de conservation des sols

En modifiant les facteurs **C** (couverture végétale) et **P** (pratiques anti-érosives), on peut simuler l'effet de mesures comme :

- L'implantation de cultures de couverture (réduction du facteur C).
- La construction de terrasses ou de bandes enherbées (réduction du facteur P).

Application : Une étude utilisant la RUSLE peut montrer que des terrasses réduisent l'érosion de 70 %, justifiant leur coût d'installation.

2.3.3. Planifier l'aménagement du territoire

Les décideurs utilisent la RUSLE pour :

- Classer les terres selon leur sensibilité à l'érosion (zones prioritaires pour la protection).
- Élaborer des réglementations pour limiter le défrichement ou l'agriculture intensive sur les pentes fortes.

Exemple : Au Brésil, la RUSLE a servi à définir des zones de préservation obligatoire dans le code forestier.

2.3.4. Étudier l'impact des changements climatiques

Le facteur **R** (érosivité des pluies) est sensible aux modifications du régime des précipitations.

La RUSLE aide à anticiper :

- L'augmentation de l'érosion dans les zones où les pluies deviennent plus intenses (Panagos *et al.*, 2022).
- L'efficacité des mesures d'adaptation (ex : agroforesterie).

2.3.5. Préserver la productivité agricole à long terme

L'érosion appauvrit les sols en nutriments et réduit leur capacité à retenir l'eau. La RUSLE permet de :

- Calculer le taux de perte de sol tolérable (en fonction de la vitesse de formation du sol).
- Éviter la dégradation irréversible des terres cultivables.

Donnée clé : Selon la FAO, 33 % des sols mondiaux sont déjà dégradés par l'érosion.

Limites de l'équation

Bien qu'utile, la RUSLE ne prend pas en compte :

- L'érosion éolienne.
- Les phénomènes extrêmes (glissements de terrain, ravinement).
- Les processus biologiques (effet des racines, activité des vers de terre).

Elle reste donc un outil complémentaire à d'autres méthodes (modélisation 3D, mesures in situ).

L'équation de Wischmeier est un outil indispensable pour :

- ☐ Diagnostiquer l'érosion.
- ☐ Choisir des solutions adaptées.
- ☐ Sensibiliser aux enjeux de la dégradation des sols.

Son application va de la parcelle agricole aux politiques publiques, en passant par la recherche climatique.

3. La protection des pentes contre l'érosion

La protection des pentes contre l'érosion : Procédés spéciaux de conservation des sols. L'érosion des sols en pente est un problème majeur en agriculture, en foresterie et en aménagement du territoire. Pour la prévenir, plusieurs techniques efficaces peuvent être mises en œuvre, combinant souvent des approches végétales, mécaniques et culturales.

3.1. Méthodes de protection des pentes contre l'érosion

3.1.1. Méthodes Végétales (Bio-ingénierie)

a) Végétalisation des Pentes

- Plantation d'espèces stabilisatrices :
- Herbes** (ex : vetiver, ray-grass) pour retenir le sol.
- Arbustes et arbres (ex : saules, acacias) pour renforcer la structure racinaire.
- Cultures en bandes alternées : Alternier rangées de cultures et bandes enherbées pour réduire le ruissellement.

b) Couverture Végétale Permanente

- Paillage (paille, bois raméal fragmenté) pour protéger le sol des impacts de pluie.
- Engrais verts (trèfle, moutarde) entre les cultures pour limiter l'érosion.

Avantage : Améliore la biodiversité et la fertilité du sol.

c) Les fascines vivantes (Live Fascines)

Les fascines vivantes constituent une technique de génie biologique particulièrement efficace pour stabiliser les pentes moyennement raides (20-45%). Cette méthode consiste à disposer des branches vivantes d'espèces ligneuses (saules, peupliers) dans des sillons creusés le long des courbes de niveau, maintenues par des piquets en bois. Les boutures émettent des racines et des pousses, créant ainsi un réseau vivant de stabilisation.

Avantages :

- Réduction de 60-80% du ruissellement superficiel
- Coût 3 à 5 fois inférieures aux murs de soutènement
- Intégration paysagère naturelle

d) Les gabions végétalisés

Cette technique combine des structures en gabions (cages métalliques remplies de pierres) avec une végétalisation ultérieure. Les gabions servent de structure de soutien immédiate tandis que les plantes (lierre, rosiers rampants) colonisent progressivement la structure.

Applications :

- Talus routiers
- Berges de cours d'eau
- Pentes instables (>50%)

Performance :

Durée de vie >25 ans

Résistance à des vitesses d'écoulement jusqu'à 5 m/s

e) Le mulch de coco avec hydro-ensemencement

Technique innovante combinant :

1. Application d'un mulch de fibre de coco (5-10 cm d'épaisseur)
2. Projection d'un mélange hydraulique contenant :
 - Semences adaptées au milieu
 - Liants biodégradables

- Engrais à libération lente

Avantage :

- Protection immédiate contre l'érosion
- Taux de germination >85%
- Applicable sur pentes jusqu'à 70%

Données techniques :

Dosage recommandé : 2-3 kg de semences/100 m²

Résistance au ruissellement après 72h

f) Les palissades en bois avec géotextile

Système composite utilisant :

- Piquets en bois dur (châtaignier, acacia) espacés de 1m
- Géotextile biodégradable (fibre de coco ou jute)
- Remblai terreux végétalisé

Mise en œuvre :

1. Implantation des piquets en quinconce
2. Fixation du géotextile côté amont
3. Remplissage avec terre locale
4. Plantation d'espèces couvre-sol

Durée de vie :

Géotextile : 2-5 ans (dégradation progressive)

Piquets : 10-15 ans

g) Les systèmes de drains secs japonais (Kaso)

Technique traditionnelle japonaise adaptée aux fortes pentes (>60%) combinant :

- Réseau de drains en pierres sèches
- Captage des eaux souterraines
- Végétation spécifique (bambou nain, azalées)

Principes clés :

- Pente des drains : 5-15%
- Diamètre des pierres : 10-30 cm
- Espacement : 3-5 m selon la pente

Efficacité :

Réduction de 90% des glissements superficiels

Coût d'entretien <100€/an/100m²

3.1.2. Méthodes Mécaniques (Génie Civil)

a) Terrassement et Terrasses

- Terrasses agricoles (en courbes de niveau) pour casser la pente et ralentir l'eau.
- Banquettes (petites terrasses) adaptées aux zones semi-arides.

b) Ouvrages de contrôle du ruissellement

- Bassins de rétention pour capter les eaux de ruissellement.
- Fossés et rigoles pour canaliser l'eau sans éroder le sol.

Exemple : Les rizières en terrasses d'Asie du Sud-Est, efficaces depuis des siècles.

3.1.3. Pratiques culturales anti-érosives

a) Travail du sol adapté

- Labour suivant les courbes de niveau (au lieu de monter/descendre la pente).
- Techniques sans labour (semis direct) pour préserver la structure du sol.

b) Rotation des cultures

- Alternier cultures érosives (maïs) et cultures protectrices (légumineuses).

Effet : Réduction du facteur C dans l'équation RUSLE.

3.1.4. Solutions Innovantes

a) Géotextiles et Filets Anti-Érosion

- Toiles biodégradables (en coco, jute) pour stabiliser les sols en pente forte.
- Filets de rétention des sédiments en construction routière.

b) Modélisation et Surveillance

- Drones et SIG pour cartographier les zones à risque.
- Capteurs IoT mesurant l'humidité et le ruissellement en temps réel.

3.1.5. Exemple de Projet Réussi

Lieu : Rwanda (collines érodées).

Solution :

- ✓ Terrasses en pierres sèches + plantation de vetiver.
- ✓ Réduction de l'érosion de 80 % en 5 ans (source : FAO, 2020).

La protection des pentes repose sur :

- ☐ Une approche intégrée (végétale + mécanique).
- ☐ Des techniques adaptées au contexte local (climat, pente, type de sol).
- ☐ Un entretien régulier des aménagements.

Ces procédés spécialisés offrent des solutions durables adaptées à différents contextes pédoclimatiques, combinant souvent efficacité technique et valeur écologique. Le choix dépendra de la pente, de la nature du sol, du climat et des contraintes économiques du projet.

3.2. Érosion des sols : Définition, Types et Impact sur les Pentes

3.2.1. Définition du processus d'érosion :

L'érosion est un processus naturel ou accéléré par les activités humaines qui entraîne la détérioration et le transport des particules du sol par des agents comme l'eau, le vent, la glace ou la gravité. L'érosion est un processus d'usure de la surface de la terre, qui comprend la roche, le sol, le sable, les métaux, etc., sous l'action de forces naturelles (telles que l'eau, le vent, la glace et la gravité) et le transport des produits détachés ou dissous avec d'autres matériaux du lieu d'origine vers un autre lieu. Cette altération, appelée érosion, se produit lorsque la roche est décomposée et dissoute en petites particules sous l'effet de processus chimiques, physiques et biologiques. Cependant, l'érosion peut également avoir des impacts négatifs, tels que la perte de sols fertiles, la destruction d'habitats naturels et la dégradation de la qualité de l'eau, affecte les écosystèmes et peut provoquer des catastrophes naturelles (glissements de terrain, ensablement des cours d'eau).

C'est un processus de détachement, transport et dépôt des particules du sol sous l'effet d'agents physiques (eau, vent, gravité) ou anthropiques." **(Morgan, 2005)**

Autrement dit, l'érosion pour les sols : c'est l'enlèvement de matériaux de la surface du sol par altération, eau courante, glace en mouvement, vent et mouvement de masse. Donc, Il existe différents d'érosion : hydrique (eau), éolienne (le vent), glaciaire (la glace) ou gravitaire (la gravité).

En réalité, les différents types d'érosion dépendent de la gravité qui agit sur l'eau (hydrique), sur les masses atmosphériques (éolienne), sur les masses de glace (glaciaire) et sur les solides (gravitaire) (Lal, 1994 ; Eswaran & Reich, 2001).

3.2.2. Le mécanisme de l'érosion : Le mécanisme d'érosion se fait selon les trois processus, qui sont (Boiffin & Papy, 1990) :

- Le détachement,
- Le transport,
- Le dépôt.

- Le détachement

Avant que les sédiments et matières organiques soient transportés, ils doivent d'abord être détachés des forces cohésives présentes dans le sol. Ce détachement peut se faire par l'impact des gouttes de pluie, par une combinaison d'impacts des gouttes de pluie et du ruissellement, ou par le ruissellement seul ou par le vent. L'énergie requise pour détacher les particules est plus importante que pour les transporter.

- Le transport

Les particules détachées sont déplacées par l'eau (ruissellement), le vent ou les glaciers. Ceci correspond au mouvement des sédiments vers l'aval, que ce soit sur un versant ou dans un cours d'eau.

- Le dépôt

Les particules transportées sont déposées dans un nouvel emplacement, souvent dans des cours d'eau, des vallées ou des plaines. Tôt ou tard, les sédiments transportés par le ruissellement ou le vent se déposent. Le dépôt peut se faire à l'intérieur d'une parcelle sur le même versant, dans le fossé en limite de parcelle, sur la route, dans le ruisseau, une rivière, la mer... Très souvent les conséquences provoquées par le dépôt des sédiments sont aussi graves.

3.2.3. Les facteurs d'érosion :

L'érosion résulte de l'action combinée des facteurs naturels et des facteurs anthropiques. De nombreux facteurs différents peuvent influencer le taux et l'étendue de l'érosion, notamment le type de roche ou de sol érodé, l'intensité et la durée des forces érosives et la présence de dispositifs de protection tels que la végétation ou les structures artificielles. Les facteurs d'érosion influencent l'intensité des processus de détachement, de transport et de dépôt. Les facteurs agissent donc sur les processus qui eux conduisent à des formes d'érosion spécifiques sont (**Duchaufour, 1997 ; Lal, 2001**) :

- La végétation,
- La pluie,
- La topographie,
- Le sol,
- Les techniques culturales
- Le climat

- La végétation :

Elle est de loin le facteur le plus important. La végétation vivante protège la surface du sol de l'impact des gouttes de pluie ; les tiges et troncs forment des obstacles qui ralentissent la vitesse du ruissellement, ce qui réduit le détachement par le ruissellement ainsi que sa capacité de transport. Les racines forment un réseau près de la surface qui tient le sol en place, augmentant ainsi sa résistance au détachement.

- La pluie

C'est souvent le deuxième facteur d'importance après la végétation. Il n'y a ruissellement que quand la vitesse avec laquelle la pluie arrive au sol est plus importante que la vitesse avec laquelle l'eau entre dans le sol. Dit autrement, le ruissellement est la différence entre l'intensité de la pluie et le taux d'infiltration d'eau dans le sol.

- La topographie

Trois aspects de la topographie sont à prendre en compte : l'inclinaison de la pente, la longueur de pente, et la présence de concavités et convexités. Ces facteurs ne sont pas entièrement indépendants.

- Le sol

Les sols varient énormément en fertilité et en vulnérabilité à l'érosion. L'érodabilité du sol est une mesure de la facilité avec laquelle le sol est érodé. Certains sols résistent bien à l'érosion, d'autres beaucoup moins. L'érodabilité du sol dépend surtout de sa « stabilité structurale ». La stabilité structurale est une propriété qui se mesure par un tamisage dans l'eau et est un indice de la résistance à la désagrégation d'un sol. C'est une mesure de la cohésion des agrégats et de leur capacité à ne pas se désagréger sous l'effet de la pluie. La stabilité structurale dépend des propriétés qui donnent une cohésion au sol :

a- La texture :

Des textures avec trop peu d'argiles ont une faible cohésion et donc une faible stabilité structurale.

b- La matière organique :

La matière organique se trouve dans le sol sous plusieurs formes : vivante dans les racines, fraîchement tombée au sol, partiellement décomposée, très humifiée, il faut noter que l'humus a un impact important sur la stabilité électrostatique positive.

c- Le type de cation dans le sol :

Les argiles ont une charge électrostatique négative, les cations en solutions ont une charge électrostatique positive. L'attraction entre argiles et cations permet aux argiles de former des agrégats par des « ponts cationiques ». Le calcium est un cation particulièrement bénéfique pour la structure du sol et favorise la formation d'agrégats stables.

d- L'impact d'une faible stabilité structurale :

La stabilité structurale est probablement le meilleur indice de l'érodabilité d'un sol. Elle joue sur plusieurs facteurs qui influencent le taux d'érosion :

- Sur la taille des produits de la désagrégation : une faible stabilité structurale conduit à une désagrégation plus intense. Dans ce cas, les produits de la désagrégation (les micro-agrégats) sont petits et donc plus facilement détachés et transportés.

- **Les techniques culturales** : L'Homme accentue le processus d'érosion par la destruction de la couverture végétale, à diverses fins (défrichements, Surcharge du milieu naturel par les populations tant animales, qu'humaines (migration incontrôlée, surpâturage,...)).

- **Le climat** : Il agit principalement par la pluie ; le vent et la température.

3.2.4. Les différents types de l'érosion

L'érosion peut prendre diverses formes, en fonction des causes ou du milieu ou du matériau érodé, et peut être différenciée en différents types d'érosion, tels que l'érosion éolienne, hydrique, anthropique, gravitationnelle et du sol. En guise de résumé, nous vous présentons l'érosion et les différents types que l'on retrouve dans la nature :

3.2.4.1. L'érosion éolienne :

Est causée par le vent, qui se déplace généralement des zones de haute pression vers les zones de basse pression et, par sa force, transporte les matériaux érodés d'un endroit à l'autre. L'érosion éolienne est causée par le vent et revêt une grande importance dans les zones où il y a des vents forts et des sols à texture fine (comme les sols sablonneux), affectés par un pâturage intensif en période de sécheresse. L'érosion éolienne contribue également à l'exposition de la surface du sol, générant des zones exposées et lisses sur des sols imperméables qui, en raison de l'absence de surface du sol, de leur faible perméabilité et de leur concentration généralement élevée en sel, sont difficiles à végétaliser de nouveau. Par ailleurs, l'érosion éolienne tend à être plus prononcée dans les zones sablonneuses (qui ne retiennent pas bien l'humidité et ne sont pas très fertiles) et moins importante dans les zones cultivées à texture grossière où se forment

des agrégats plus ou moins gros qui sont trop épais et lourds pour être transportés par le vent, même si celui-ci est fort.

3.2.4.2. L'érosion par l'eau (hydrique) :

Est causée par l'eau de pluie (l'érosion pluviale) et les écoulements d'eau (l'érosion fluviale), qui transportent des particules de roches altérées et les déposent à des altitudes plus basses, ainsi que par le mouvement des vagues (l'érosion marine ou par vagues), dont l'énergie cinétique transporte les particules de sable vers d'autres endroits. L'eau joue un rôle important dans l'altération des roches, car elle lave et transporte les matériaux altérés d'un endroit à l'autre. L'érosion hydrique peut être facilitée par l'activité humaine ou peut également se produire naturellement. Dans tous les cas, l'eau des rivières, des océans et de la pluie transporte les matériaux de leur point d'origine vers une zone distincte.

- L'érosion fluviale peut entraîner une décoloration des lits de rivière car, lorsqu'ils s'écoulent des vallées vers les océans et les mers, le processus d'érosion génère une grande accumulation de sédiments qui se déposent dans de nouvelles zones.
- Une autre forme d'érosion hydrique est causée par les vagues et les courants (l'érosion marine), qui érodent et modifient la terre et génèrent des particules érodées qui se déposent et modifient le littoral de la zone en question.
- Enfin, l'érosion pluviale est causée par l'eau de pluie, qui gonfle le lit des rivières, augmentant l'érosion fluviale et érode les parois des montagnes, ainsi que les sols de tous types. De plus, lorsqu'il y a des pluies acides, l'usure n'est pas seulement physique en raison du frottement de l'eau, mais elle s'accroît également en raison des réactions chimiques et corrode les surfaces de toutes sortes.

3.2.4.3. L'érosion anthropique :

L'érosion anthropique est causée par les activités humaines telles que l'agriculture, l'industrie, la construction d'infrastructures, le surpâturage, la déforestation, le transport de

personnes et de marchandises, etc. Ces actions ont pour conséquence la perte de la couche arable, créant ainsi un sol artificiel fortement influencé par cette activité humaine.

3.2.4.4. L'érosion glaciaire :

Est causée par le mouvement descendant de blocs de glace glaciaire qui, au fil du temps, érodent la surface rocheuse sous-jacente, l'érosion par la force de gravité, qui provoque le mouvement descendant de l'eau et des particules.

3.2.4.5. L'érosion du sol :

Est la perte de qualité du sol et peut être causée par les divers types déjà mentionnés. L'érosion du sol est l'usure de la couche arable causée par le vent, l'eau, les cultures ou la déforestation, entre autres facteurs et peut aussi être une érosion due à la température, à la gravité, aux produits chimiques, etc. Il s'agit du processus par lequel la végétation qui protège le sol disparaît, le laissant nu et vulnérable aux agents physiques, tels que les pluies qui peuvent même provoquer des glissements de terrain et des coulées de boue, avec leurs conséquences potentiellement dommageables, et la libération de substances toxiques, telles que les pesticides et les engrais qui ont été déversés sur des plans d'eau, comme les rivières et les ruisseaux. Parmi les autres effets de l'érosion du sol, on peut citer la perte de qualité du sol due à la perte des nutriments de la matière organique, ce qui rend difficile la croissance de la végétation.

3.2.4.6. L'érosion glaciaire :

L'érosion glaciaire est causée par les glaciers, qui sont de grandes accumulations de glace couvertes de neige, typiques des zones montagneuses ou côtières comportant de grandes falaises. Si la base de la glace commence à fondre, le glacier glisse sur le substrat, l'érodant sur son passage. Il ramasse des matériaux sur son chemin, tels que des grains de sable et de gros rochers, qui sont entraînés, érodant le substrat rocheux sur son passage, ainsi que la glace elle-même et faisant perdre de la taille au glacier.

3.2.5. Impacts de l'érosion du sol :

L'érosion peut être dangereuse dans certaines circonstances, en particulier lorsqu'elle se produit à un rythme accéléré en raison d'activités humaines ou de catastrophes naturelles. Une érosion rapide peut causer glissements de terrain, ce qui peut être dangereux pour les personnes vivant dans des zones sujettes à glissements de terrain. L'érosion peut aussi conduire à la perte d'une couche arable précieuse, ce qui peut compliquer la croissance des cultures et nuire à l'environnement.

Les nombreux impacts environnementaux du sol l'érosion peut être ressentie sous diverses formes et ampleurs. Dans la mosaïque complexe des écosystèmes de notre planète, l'érosion des sols apparaît comme une menace silencieuse mais redoutable, aux conséquences considérables. Au-delà du déplacement visible de la terre, ce risque environnemental pèse lourdement sur l'équilibre délicat de la nature, laissant une traînée de destruction qui se répercute sur divers paysages.

Des terres agricoles aux étendues sauvages vierges, les impacts mortels de l'érosion des sols s'étendent au-delà de la perte immédiate de la couche arable fertile, et nous allons décrire ces impacts de manière très réaliste et époustouflante.

3.2.5.1. Perte de terre végétale fertile :

L'érosion des sols a un impact environnemental important avec des conséquences potentiellement dévastatrices. La couche arable est la couche supérieure du sol, riche en nutriments et cruciale pour la croissance des plantes. L'érosion du sol, provoquée par des facteurs tels que l'eau ou le vent, peut entraîner l'élimination de cette couche arable fertile.

Lorsque la couche arable fertile est érodée, cela affecte la capacité du sol à soutenir la vie végétale et soutenir l'agriculture. La perte de nutriments, de matière organique et de micro-organismes bénéfiques de la couche arable peut entraîner une diminution de la fertilité du sol. Ceci, à son tour, peut entraîner une diminution des rendements agricoles, une diminution de la productivité agricole et une dépendance accrue aux engrais synthétiques.

Les conséquences s'étendent au-delà de l'agriculture, car la perte de terres arables fertiles a également un impact sur les écosystèmes et la biodiversité. Les plantes et la végétation dépendent d'un sol sain pour leur croissance, et lorsque la couche arable est érodée, cela perturbe l'équilibre des écosystèmes et peut entraîner une dégradation de l'habitat. En outre, la sédimentation dans les plans d'eau due à l'érosion des sols peut nuire aux écosystèmes aquatiques, affectant la qualité de l'eau et la vie aquatique **(FAO, 2022)**.

3.2.5.2. Impact sur le climat :

L'impact climatique de l'érosion des sols est lié à la libération de dioxyde de carbone et à l'altération des propriétés de la surface des terres, qui peuvent toutes deux contribuer au changement climatique et perturber les modèles climatiques locaux. Lorsque le sol est érodé, cela entraîne souvent le déplacement de matière organique et de particules du sol. Ce processus peut exposer la matière organique à l'oxygène, entraînant une décomposition accélérée de la matière organique. En se décomposant, la matière organique libère du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Le CO₂ est un gaz à effet de serre qui contribue à l'effet de serre, contribuant ainsi au changement climatique. Émissions de CO₂ : La dégradation des sols libère 24 milliards de tonnes de CO₂/an (IPCC, 2019).

- Pertes de carbone organique : Jusqu'à 75% dans les sols érodés **(Lal, 2020)**.

De plus, l'érosion des sols peut affecter la couverture végétale, entraînant des changements dans les propriétés de la surface des terres et modifiant les modèles climatiques locaux. La végétation joue un rôle crucial dans la régulation de la température, des précipitations et des conditions climatiques globales. La disparition de la végétation due à l'érosion peut perturber ces processus de régulation, entraînant potentiellement des changements dans les modèles climatiques régionaux.

3.2.5.3. Pollution de l'eau :

La pollution de l'eau résultant de l'érosion des sols a des effets en cascade sur les écosystèmes, la biodiversité et les communautés humaines qui dépendent d'une eau propre. Lorsque le sol est érodé, il transporte souvent divers polluants, notamment des sédiments, des pesticides, les engrais, et d'autres contaminants. Ces matériaux érodés peuvent se retrouver dans les plans

d'eau à proximité, tels que les rivières, les lacs et les ruisseaux, provoquant ainsi une pollution de l'eau.

La sédimentation de l'eau causée par l'érosion du sol peut entraîner un niveau élevé de turbidité dans l'eau, ce qui réduit la pénétration de la lumière et affecte ainsi l'écosystème aquatique. Une sédimentation excessive peut nuire aux habitats du poisson, perturber les habitudes alimentaires des organismes aquatiques et dégradent la qualité globale de l'eau. Le ruissellement de pesticides et d'engrais provenant des sols érodés peut introduire des produits chimiques nocifs dans les systèmes d'approvisionnement en eau. Ces polluants peuvent entraîner des proliférations d'algues et des déséquilibres en nutriments, ce qui a un impact négatif sur la vie aquatique. Dans certains cas, les polluants issus de l'érosion des sols peuvent contaminer les sources d'eau potable, ce qui présente des risques pour la santé humaine et même conduire à la mort.

3.2.5.4. Augmentation des inondations :

L'érosion des sols entraîne souvent la disparition de la végétation et la perturbation des écosystèmes naturels. La perte de végétation réduit la capacité des plantes à absorber et à ralentir les précipitations, tandis qu'une modification des modes de drainage peut entraîner une augmentation du ruissellement de surface.

Avec une végétation réduite et un ruissellement accru, l'eau se déplace plus rapidement à la surface des terres, submergeant potentiellement les rivières et les systèmes de drainage. Ce débit d'eau accru peut entraîner une augmentation des inondations dans les zones en aval.

Les sédiments transportés par les sols érodés peuvent également s'accumuler dans les cours d'eau, exacerbant ainsi la situation en réduisant la capacité des rivières et des ruisseaux à transporter l'eau. En outre, les particules de sol érodées peuvent obstruer les égouts et les canaux d'eaux pluviales, réduisant ainsi leur efficacité et augmentant le risque d'inondations localisées, en particulier dans les zones urbaines.

3.2.5.5. Productivité agricole réduite :

La baisse de la productivité agricole constitue un impact environnemental important de l'érosion des sols. L'érosion des sols entraîne souvent la perte de la couche arable fertile, essentielle à la croissance des plantes et à l'approvisionnement en nutriments. La perte de la couche arable entraîne une réduction de la fertilité des sols, ce qui, à son tour, peut entraîner une diminution des rendements agricoles et une baisse de la productivité agricole. Sans nutriments et matières organiques adéquates, les plantes ont du mal à croître de manière optimale, ce qui les rend plus sensibles aux maladies et aux facteurs de stress environnementaux. Les agriculteurs peuvent avoir du mal à maintenir des pratiques agricoles durables et rentables en raison de la baisse de la fertilité des sols causée par l'érosion. Cet impact affecte non seulement la production alimentaire, mais contribue également aux difficultés économiques des communautés dépendantes de l'agriculture.

3.2.5.6. Perturbation des écosystèmes :

La perte de sols fertiles peut perturber l'équilibre des écosystèmes en affectant le couvert végétal et les habitats de divers organismes. Les modifications de la végétation induites par l'érosion peut entraîner des modifications dans composition des communautés végétales, favorisant potentiellement les espèces envahissantes qui prospèrent dans des conditions de sol dégradées. Ceci, à son tour, peut avoir un impact sur les animaux et les micro-organismes qui dépendent d'espèces végétales spécifiques pour se nourrir et s'abriter.

La sédimentation résultant de l'érosion des sols peut également nuire aux écosystèmes aquatiques lorsque des particules de sol érodées pénètrent dans les plans d'eau. Une sédimentation accrue peut étouffer les habitats aquatiques, dégrader la qualité de l'eau et avoir des effets négatifs sur les poissons et autres organismes aquatiques.

3.2.5.7. Perte de biodiversité :

L'érosion des sols contribue à la perte de biodiversité en perturbant les habitats, modification des conditions du sol et la dégradation des écosystèmes. L'érosion des sols peut entraîner le déplacement de la couche arable, qui contient des nutriments essentiels et

soutient une vie végétale diversifiée. En conséquence, les habitats qui abritent diverses espèces végétales et animales peuvent être dégradés ou détruits.

La perte de végétation due à l'érosion des sols peut avoir un impact négatif sur la diversité végétale, car certaines espèces peuvent avoir du mal à survivre dans des conditions de sol modifiées. De plus, l'érosion des sols peut entraîner fragmentation de l'habitat, ce qui rend difficile pour certaines espèces de trouver des zones appropriées pour se nourrir, se reproduire et s'abriter. Les écosystèmes aquatiques sont également affectés lorsque des particules de sol érodées pénètrent dans les plans d'eau, entraînant une sédimentation. Cette sédimentation peut nuire aux habitats aquatiques, ayant un impact sur la diversité des poissons et d'autres espèces

Destruction des Habitats

- Disparition des micro-organismes du sol : Réduction de 40% de la faune édaphique dans les sols dégradés (**Orgiazzi et al., 2016**).
- Fragmentation des écosystèmes : Ravinement et glissements perturbent les corridors écologiques.

Appauvrissement des Espèces Végétales

- Perte de plantes endémiques : Ex. : 50% des espèces herbacées disparues en Méditerranée (**UE, 2020**).
- Invasion d'espèces pionnières (ex : bambou en Asie), réduisant la diversité native.
- Les terrains appauvris sont abandonnés et chacun court alors pour mettre en exploitation de nouveaux terrains de culture. Cette pénurie de terrains cultivables a pour conséquence une émigration des travailleurs vers d'autres régions ou pays plus favorables.
- La régénération naturelle des arbres, arbustes et plantes fourragères, continuellement exploités se fait très difficilement ou pas du tout.
- L'assèchement des puits en saison sèche par suite de la baisse du niveau de la nappe phréatique.

3.2.5.8. Impacts socioéconomiques

- Coûts Agricoles

- Pertes financières : \$400 milliards/an au niveau mondial (**Banque Mondiale, 2021**).
- Exode rural : 25 millions de migrants climatiques/an liés à la désertification (**ONU, 2022**).

- Santé publique

- Maladies hydriques : Coliformes et métaux lourds dans l'eau (ex : arsenic au Bangladesh).
- Insécurité alimentaire : 815 millions de personnes souffrant de malnutrition (**FAO, 2023**).

- Infrastructures Endommagées

- Routes et voies ferrées : Coûts de réparation \$10–15 milliards/an dans les pays en développement (**Banque Mondiale**).
- Habitations : Glissements de terrain détruisent 10 000 maisons/an en Asie du Sud-Est.

3.2.6. Conséquences de l'érosion du sol :

Le sol est une fine couche de matières minérales et organiques qui permettent la rétention et la circulation de l'eau et de l'air à la surface de la terre. Cette fine couche, dont l'épaisseur varie de quelques cm à quelques m, fait vivre pratiquement toutes les formes de vie de la planète. Le sol est une ressource « non-renouvelable » qui, lorsqu'il subit une forte érosion, est perdu à l'échelle de millénaires. L'être humain, par certaines de ses actions, augmente l'érosion. Par exemple, la déforestation, l'agriculture, l'urbanisation et le transport ont pour effet d'accélérer l'érosion.

- Lorsqu'on défriche une terre, on enlève la couverture végétale et on expose ainsi le sol au vent et à l'éboulement.
- Lorsqu'on construit des barrages, les cours d'eau sont alors déviés.

- En construisant des routes, on augmente les surfaces de ruissellement.
- Lorsqu'on utilise des bateaux à moteur ou des motomarines, on détruit des habitats, on augmente la turbidité de l'eau et on libère de nutriments qui causent l'augmentation des algues.

Ces activités ont des conséquences sur les plans économiques et environnementaux. Le meilleur moyen de limiter l'érosion consiste à préserver la végétation, car les racines des plantes contribuent à maintenir le sol en place.

-L'utilisation de pesticides et d'engrais chimiques entraîne la destruction de la pédofaune (faune du sol) pourtant essentielle à l'aération des sols, la conséquence notoire de ce phénomène est le ruissellement entraînant inondations et coulées de boue.

-L'érosion éolienne, aggravée par le surpâturage et le labour dans certains cas, entraîne des tempêtes de poussière

-L'agriculture, en modifiant la composition et la structure des sols, rend plus complexe le stockage du CO₂ dans les sols. En effet, la conversion de prairies, forêts ou tourbières en culture diminue fortement le stockage pédologique du carbone dans le sol.

-La biodiversité : Le sol est un milieu vivant où des milliards de bactéries, champignons, et insectes de tous genres habitent. Sa dégradation provoque une perte d'espèces dont nous avons peu conscience à cause des difficultés de mesure et de suivi de ces micro-organismes. De plus, la dégradation du sol provoque inévitablement une perte d'habitat pour divers espèces à la surface de la terre et dans les milieux aquatiques.

-La désertification : il est à noter que la perte du sol dans les milieux semi-arides conduit à la création de vastes zones « stériles » et des conditions de sécheresse aggravée par une augmentation du ruissellement et par la diminution de la réserve hydrique du sol.

-La pollution des eaux : Pratiquement toute l'eau qui tombe sur une surface terrestre entre en contact avec le sol. L'eau peut s'infiltrer et percoler vers la nappe phréatique et les cours d'eau, et dans ce cas, elle lessive une partie de ce qui est soluble dans le sol (nitrates, pesticides...). Elle peut également ruisseler à la surface et transporter vers les cours d'eau les sédiments et tout ce qui y sont associés : pesticides, engrais, matières organiques.

La transformation des sols entraîne une modification de la qualité des eaux, notamment lorsque des particules de sols sont emportées dans les eaux augmentant ainsi leur turbidité et leur apport en phosphore et azote

3.3. Impact des Pentes sur l'Érosion

3.3.1 Relation Pente-Érosion

- Loi fondamentale :

$E \propto$

$\tan(\theta) \times L$

E

où $(\theta) =$ angle de pente, $(L) =$ longueur de pente.

- **Seuils critiques :**

-<5% : Faible risque

- 5–15% : Risque modéré (zones agricoles)

- >30% : Risque très élevé (nécessite stabilisation) (**Renard *et al.*, 1997**).

3.3.2. Effet de la Longueur de Pente

- Une pente 2 fois plus longue peut quadrupler l'érosion (**Wischmeier & Smith, 1978**).

3.3.3 Pentes et Types d'Érosion Dominants (FAO, 2015) (Tab 8).

Tableau 8 : Pentes et Types d'Érosion Dominants (FAO, 2015)

Pente (%)	Type d'Érosion Prédominant
0–2	Érosion éolienne
2–10	Érosion en nappe
10–30	Érosion en rigoles
>30	Glissements/ravinement

L'érosion des sols est un phénomène complexe influencé par :

- ☐ Le type d'agent érosif (eau/vent/gravité)
- ☐ La pente et sa longueur (loi exponentielle)
- ☐ Les activités humaines (déforestation, agriculture intensive)

4. La Construction des terrasses

Les terrasses sont des aménagements agricoles construits en suivant les courbes de niveau des pentes pour réduire l'érosion hydrique, améliorer la rétention d'eau et faciliter la culture sur des terrains inclinés. Elles sont largement utilisées dans les régions montagneuses et semi-arides pour préserver la fertilité des sols. Ces techniques remontent à des civilisations anciennes, comme les Incas (andenes) et les paysans asiatiques (rizières en terrasses).

4.1. Types de terrasses

Plusieurs types de terrasses sont adaptés selon la pente, le climat et le type de culture :

- **Terrasses en gradins (banquettes)** : Plateformes horizontales soutenues par des murets en pierre ou en terre, utilisées pour les cultures permanentes.
- **Terrasses progressives (bench terraces)** : Créées par un labour répété suivant les courbes de niveau, sans structure rigide.
- **Terrasses à pente inversée** : Légèrement inclinées vers l'amont pour retenir l'eau.
- **Terrasses vivantes (fanya juu en Afrique de l'Est)** : Construites en empilant des bandes de terre et de végétation pour former des digues.

4.2. Techniques de construction des terrasses

La construction des terrasses suit des étapes précises :

- 1. Étude topographique** : Identification des courbes de niveau à l'aide d'un niveau à bulle ou d'un GPS.
- 2. Déblai et remblai** : Excavation de la terre en amont et remblayage en aval pour former une plateforme plane.
- 3. Stabilisation des murets** : Utilisation de pierres, de bois ou d'herbes (comme le vetiver) pour renforcer les bordures.
- 4. Drainage** : Installation de canaux d'évacuation pour éviter la saturation en eau.

4.3. Avantages des terrasses pour la conservation des sols :

Les terrasses constituent l'une des méthodes les plus efficaces pour lutter contre la dégradation des sols en zones pentues. Leurs bénéfices englobent la réduction de l'érosion, l'amélioration de la fertilité et l'optimisation de la gestion de l'eau.

a) Réduction de l'érosion hydrique et éolienne

- Limitation du ruissellement : En fractionnant les pentes, les terrasses diminuent la vitesse de l'eau, réduisant ainsi l'érosion en rigoles et en ravines (**Morgan, 2005**).
- Stabilisation des sols : Les murets ou les banquettes empêchent le déplacement des particules fines sous l'effet des pluies et du vent (**FAO, 2019**).
- Réduction de l'érosion : Les terrasses diminuent la vitesse du ruissellement, limitant la perte de sol (**Morgan, 2005**).

b) Amélioration de la rétention d'eau

- Amélioration de l'infiltration : Les terrasses favorisent la pénétration de l'eau dans le sol, rechargeant les nappes phréatiques et réduisant les risques de sécheresse (**CIAT, 2017**).
- Réduction des inondations : En ralentissant le ruissellement, elles atténuent les crues en aval.
- Augmentation de la productivité : Les surfaces planes facilitent l'agriculture intensive.

c) Augmentation de la fertilité des sols

- Accumulation de matière organique : Les terrasses retiennent les sédiments riches en nutriments, améliorant la productivité agricole (**Bashagaluke et al., 2018**).
- Prévention de la perte de sol arable : En zones montagneuses, elles préservent la couche superficielle du sol, essentielle pour les cultures.

d) Diversification agricole et sécurité alimentaire

- Extension des surfaces cultivables : Les terrasses permettent de cultiver des pentes autrefois inexploitable.
- Adaptation aux cultures variées : Elles conviennent aux céréales, arbres fruitiers et cultures maraîchères.

e) Bénéfices écologiques et socioéconomiques

- Préservation de la biodiversité : En limitant la dégradation, elles maintiennent les écosystèmes locaux.
- Résilience climatique : Elles atténuent les effets des pluies intenses et des sécheresses prolongées.

Les terrasses restent une solution durable pour l'agriculture en zones pentues. Les terrasses offrent une solution durable pour la conservation des sols, combinant avantages agronomiques, hydrologiques et environnementaux. Leur adoption devrait être encouragée dans les régions vulnérables à l'érosion.

Leur conception doit s'adapter aux conditions locales pour maximiser leur efficacité.

5. La stabilisation des ravins

Les ravins, formés par l'érosion hydraulique concentrée, constituent une menace grave pour les terres agricoles, les infrastructures et les écosystèmes. Leur stabilisation nécessite des techniques adaptées combinant génie végétal, ouvrages mécaniques et gestion des eaux de ruissellement. Ces méthodes visent à freiner l'approfondissement et l'élargissement des ravins tout en restaurant les sols dégradés (**Morgan, 2005 ; FAO, 2017**).

5.1. Méthodes de stabilisation des ravins

5.1.1. Techniques végétales

- **Végétalisation des berges** : Implantation d'espèces à enracinement profond (vétiver, acacias, bambou) pour stabiliser les parois (**World Agroforestry Centre, 2019**).
- **Tapissages herbacés** : **Utilisation** de plantes couvre-sol (Stylosanthes, Brachiaria) pour réduire l'impact des gouttes de pluie.

5.1.2. Ouvrages mécaniques

- Barrages en gabions :

Structures en pierres grillagées placées en travers du ravin pour freiner l'eau et favoriser le dépôt de sédiments (**World Bank, 2021**).

- Seuils en pierres sèches :

Digues basses construites avec des matériaux locaux pour casser la pente.

- Bassins de décantation :

Aménagés en amont pour piéger les particules érodées avant qu'elles n'aggravent le ravin.

5.1.3. Correction du drainage

- Déviation des eaux :

Canaux ou fossés pour détourner les flux d'eau loin des têtes de ravin.

- Contrôle de l'érosion en amont :

Terrassement, bandes enherbées ou cultures en courbes de niveau pour réduire le ruissellement.

5.2. Étapes clés de réhabilitation

1. Diagnostic du ravin (profondeur, pente, type de sol).
2. Choix des techniques (végétales, mécaniques ou mixtes).
3. Mise en œuvre progressive (travaux en saison sèche).
4. Suivi et entretien (vérification après pluies, replantation si nécessaire).

5.3. Avantages de la stabilisation des ravins : La stabilisation des ravins est une méthode essentielle de lutte contre l'érosion, offrant des bénéfices environnementaux, agricoles et socio-économiques majeurs. Voici ses principaux avantages :

a) Lutte contre l'érosion et protection des sols

- **Réduction de la perte de terres arables :** En freinant l'élargissement et l'approfondissement des ravins, cette technique préserve les sols fertiles indispensables à l'agriculture **(FAO, 2017)**.
- **Prévention de la dégradation des paysages :** Elle limite la formation de nouvelles ravines et stabilise les zones déjà érodées **(Morgan, 2005)**.

b) Amélioration de la gestion de l'eau

- **Ralentissement du ruissellement :** Les ouvrages (barrages, seuils) réduisent la vitesse de l'eau, favorisant son infiltration et rechargeant les nappes phréatiques **(World Bank, 2021)**.
- **Réduction des inondations en aval :** En captant les sédiments, les ravins stabilisés diminuent les risques de crues brutales.

c) Restauration des terres agricoles

- **Réhabilitation des zones dégradées :** Les ravins stabilisés peuvent être réutilisés pour l'agropastoralisme ou le reboisement **(World Agroforestry Centre, 2019)**.

- **Augmentation de la productivité** : Les sols protégés permettent des cultures plus durables.

d) Bénéfices écologiques

- **Préservation de la biodiversité** : La végétalisation des ravins crée des habitats pour la faune et la flore.
- **Séquestration du carbone** : Les plantes utilisées (vétiver, arbres) captent le CO₂, contribuant à atténuer le changement climatique.

e) Avantages socio-économiques

- **Protection des infrastructures** : Les ravins stabilisés évitent l'endommagement des routes, ponts et habitations.
- **Création d'emplois locaux** : Les travaux de construction et d'entretien génèrent des activités pour les communautés rurales.

Limites :

- Coût élevé des ouvrages mécaniques.
- Nécessité d'un entretien régulier.

La stabilisation des ravins est une solution gagnante pour l'environnement et les populations. La stabilisation des ravins exige une approche intégrée, combinant génie écologique et aménagements physiques, techniques traditionnelles et innovations. Des solutions locales et durables doivent être privilégiées pour une réhabilitation efficace à long terme. Elle permet de protéger les sols, l'eau et les moyens de subsistance.

6. Les Brises-Vents :

Les brise-vent sont des dispositifs végétaux ou artificiels conçus pour réduire la vitesse du vent et protéger les sols contre l'érosion éolienne. Utilisés depuis des siècles dans les régions arides et semi-arides, ils jouent un rôle crucial dans la préservation des terres agricoles et l'amélioration des conditions microclimatiques **(FAO, 2018)**.



Figure 17 : Brise-vent (Site 18)

6.1. Types de Brise-Vents

6.1.1. Brise-Vents végétaux

- **Haies d'arbres** : Combinaison d'essences à croissance rapide (Acacia, Casuarina) et d'arbres plus denses (Tamarix, Eucalyptus)
- **Rideaux arbustifs** : Utilisation d'arbustes résistants (Atriplex, Calligonum) dans les zones très arides
- **Systèmes multi-étagés** : Association d'arbres, d'arbustes et de plantes herbacées pour une protection optimale

6.1.2. Brise-Vents artificiels

- Palissades en bois ou plastique
- Clôtures tressées
- Structures géotextiles

6.2. Techniques d'implantation des Brise-Vents

6.2.1. Conception

- Orientation perpendiculaire aux vents dominants
- Densité optimale (30-50% de porosité pour une protection efficace)
- Espacement (généralement 10-15 fois la hauteur des arbres)

6.2.2. Choix des espèces

Critères de sélection :

- Résistance à la sécheresse
- Système racinaire profond
- Croissance rapide
- Valeur économique complémentaire (fourrage, bois, fruits)

6.3. Avantages des Brise-Vents pour la conservation des sols

6.3.1. Lutte contre l'érosion éolienne

- Réduction de 50-80% de la vitesse du vent (**Brenner, 2019**)
- Limitation du déplacement des particules fines responsables de la dégradation des sols
- Protection des semis et jeunes plants
- Prévention de la formation de dunes dans les zones arides et semi-arides

6.3.2. Amélioration des conditions microclimatique

- Réduction de l'évapotranspiration (15-20% d'économie d'eau)
- Protection contre les tempêtes de sable

- Augmentation de l'humidité relative (de 5 à 15%)
- Atténuation des effets des températures extrêmes (protection contre le gel et les fortes chaleurs)

6.3.3. Bénéfices Agro-écologiques

- Création d'habitats pour la faune auxiliaire
- Apport de matière organique par la chute des feuilles
- Production de bois de chauffage et de fourrage
- Création de corridors biologiques pour la faune
- Séquestration du carbone par la biomasse végétale
- Préservation de la biodiversité (habitat pour les oiseaux et insectes utiles)
- Amélioration de la qualité des sols par l'apport de matière organique

6.3.4. Augmentation de la productivité agricole

- Amélioration des rendements (10 à 30% selon les cultures)
- Extension des possibilités culturales (protection des cultures sensibles au vent)
- Réduction des pertes post-récolte (limitation du dessèchement des grains)

6.3.5. Avantages socio-économiques

- Production complémentaire (bois, fruits, fourrage, plantes médicinales)
- Réduction des coûts de production (moins d'irrigation nécessaire)
- Valorisation des terres marginales
- Création d'emplois pour l'installation et l'entretien

6.3.6. Protection des infrastructures

- Prévention de l'ensablement des routes et habitations
- Protection des bâtiments agricoles contre l'usure éolienne
- Réduction des coûts de maintenance des infrastructures

6.3.7. Adaptation aux changements climatiques

- Résilience accrue face aux événements climatiques extrêmes
- Régulation du cycle de l'eau à l'échelle locale
- Atténuation des îlots de chaleur

6.4. Études de Cas

Projet au Sahel

- Implantation de 300 km de brise-vent au Niger
- Résultats après 5 ans :
 - Augmentation de 30% des rendements céréaliers
 - Régénération naturelle de la végétation
 - Réduction des phénomènes d'encroûtement des sols

Les brise-vent constituent une solution naturelle et durable pour la conservation des sols en zones exposées à l'érosion éolienne combinant protection environnementale et avantages économiques. Leur implantation stratégique peut transformer les paysages vulnérables en systèmes agricoles résilients et productifs. Leur conception doit s'adapter aux conditions locales pour optimiser leur efficacité tout en apportant des bénéfices complémentaires aux agriculteurs.

Chapitre 4 : L'érosion éolienne

Chapitre 4 : L'érosion éolienne

1. Généralités sur l'érosion éolienne :

L'érosion éolienne (**Fig. 18**) est un processus naturel ou accentué par l'activité humaine, au cours duquel le vent détache, transporte et dépose les particules du sol. Elle est particulièrement marquée dans les régions arides, semi-arides et les terres agricoles mal protégées. C'est l'action de destruction des roches et des reliefs par le vent. L'action du vent est surtout sensible dans les régions où les sols et les roches ne sont pas protégés par un couvert végétal, (c'est-à-dire dans les régions arides chaudes et dans les régions très froides). L'érosion éolienne est produite par des particules dans l'air, par déplacement et cisaillement du vent, ou l'abrasion des matériaux qu'il transporte (**Chepil & Woodruff, 1963 ; Lal & Stewart, 1990**).

L'érosion éolienne se produit lorsque des particules de sol sont détachées, transportées et déposées par le vent. Les particules du sol peuvent rester ou quitter le champ ou la zone d'où elles sont érodées. L'énergie cinétique est la principale force de l'érosion éolienne. Le moyen le plus efficace de contrôler l'érosion est de garder la surface du sol couverte ou blindée, soit avec des plantes en croissance, soit avec des résidus de cultures passées. Il est également important de construire des sols sains grâce à des pratiques agricoles durables qui maximisent la biodiversité, maximisent la couverture vivante, maximisent les racines vivantes continues et minimisent la perturbation du sol (**FAO, 2019**). Ce processus, particulièrement actif dans les zones arides et semi-arides, représente une menace majeure pour les écosystèmes et les activités humaines (**FAO, 2021**).

1.1. Processus de l'érosion éolienne

Le vent a deux mécanismes pour éroder : il transporte (**c'est la déflation**) les éléments fins provenant des roches après qu'elles ont été attaquées par la désagrégation mécanique. La seconde action est celle de **la corrasion**, c'est-à-dire l'attaque des roches en raison de leur mitraillage par les éléments solides transportés par le vent (en particulier les sables composés de quartz très dur). Lorsque la vitesse du vent ne permet plus le transport des éléments fins ces particules tombent au sol où ils s'accumulent (cas du remodelage des dunes dans les déserts).

La déflation :

Le vent est capable de soulever les éléments fins qui se trouvent à la surface du sol. Il peut les transporter sur de très longues distances. Les éléments grossiers sont en fait déplacés au ras du sol et font comme des petits sauts consécutifs (saltation) et roulent, les éléments très fins s'envolent). Le transport peut se faire sur de très longues distances, il n'est pas rare en Europe de recevoir des poussières provenant du Sahara africain. Ainsi, la couche superficielle du sol s'amincit, les roches sous-jacentes peuvent de nouveau être exposées à la désagrégation mécanique.

La corrasion :

La corrasion est l'attaque des roches par les éléments grossiers et très durs transportés par le vent. Cette attaque est surtout sensible dans les déserts ou les régions très froides où l'absence de végétation permet au vent de prendre de la vitesse. Les éléments les plus grossiers sont surtout présents dans les couches les plus basses de l'air. C'est à ce niveau que les roches sont le plus fortement attaquées. Un peu plus haut où se trouvent des éléments plus fins, l'attaque est plus faible.



Figure 18. Erosion éolienne (UNEP, 2022)

2. Mécanismes de l'érosion éolienne

2.1.Étapes du processus :

-Détachement : Les particules fines du sol sont arrachées par la force du vent.

-Transport :

Saltation : Particules sautant sur de courtes distances.

Suspension : Particules fines transportées sur de longues distances.

Roulage : Déplacement des particules plus lourdes le long de la surface.

-Dépôt : Les particules se déposent lorsque la vitesse du vent diminue.

2.2. Modes de déplacement : Les trois modes de déplacement des particules de sol sont la suspension, la saltation et le roulement. Le mode varie selon la grosseur des particules et la puissance du vent (**Fig. 19**).

2.2.1. La saltation :

Le mouvement initial des particules du sol est une série de sauts. Le diamètre des particules en saltation est compris entre 0,5 et 1,1 mm. Après avoir sauté, les particules retombent sous l'action de la pesanteur. La partie descendante de la trajectoire est très inclinée vers le sol et pratiquement rectiligne. Peu de particules atteignent une altitude supérieure à 1 m et environ 90 % d'entre elles font des sauts inférieurs à 30 cm. L'amplitude horizontale d'un saut est généralement comprise entre 0,5 et 1 m. Le phénomène de saltation est indispensable pour amorcer l'érosion éolienne. Il est la cause de deux autres modes de transport des éléments du sol par le vent : la reptation en surface et la suspension dans l'air.

2.2.2. La reptation en surface :

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

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

****Suspension** :** Particules fines (<0,1 mm) restant en suspension

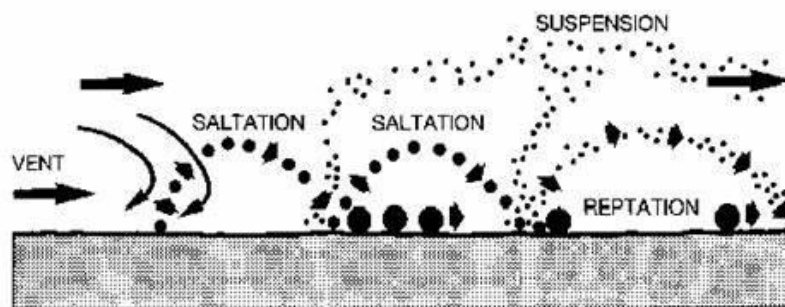


Figure 19 : Mécanismes de l'érosion éolienne (USDA, 2020).

2.2. 4. Seuils Critiques

- Vitesse seuil : 15-20 km/h à 1 m de hauteur
- Seuil d'énergie cinétique : 0,16 J/m² (**Bagnold, 1941**)

3. Formations résultantes de l'érosion éolienne :

-Dunes : accumulations de sable modelées par le vent, comme les dunes de barkhanes et les dunes longitudinales.

-Reg : Désert de pierres où le sable fin a été emporté par le vent, laissant des fragments de roches plus grosses.

4. Facteurs de l'érosion éolienne :

L'érosion éolienne s'observe dans les régions vulnérables, elle touche essentiellement qu'un faible pourcentage des terres, essentiellement les terres sableuses et les terres noires. La vitesse et l'ampleur de l'érosion causée par le vent dépendent des facteurs suivants (**Zobeck & Van Pelt, 2003**) :

4.1. Érodabilité du sol : Le vent peut soulever haut dans les airs les particules de sol très fines et les transporter sur de grandes distances (**suspension**). Il peut soulever les particules de moyennes à fines sur de courtes distances et les déplacer par petits bonds successifs qui endommagent les cultures et délogent davantage de sol (**saltation**). Si les particules de sol sont trop grosses pour que le vent les soulève, celui-ci les fait rouler à la surface du sol (**roulement**). L'abrasion engendrée par le mouvement des particules soufflées par le vent dégrade des agrégats stables à la surface du sol, ce qui accroît encore davantage l'érodabilité du sol.

4.2. Rugosité de la surface du sol : Les sols lisses opposent peu de résistance au vent. En revanche, sur les crêtes des sillons dans les sols travaillés, les particules peuvent s'assécher plus rapidement qu'ailleurs lorsque le vent se lève, ce qui fait que davantage de sol meuble et sec peut être emporté par le vent. Avec le temps, les creux tendent à se combler, de sorte que les sols rugueux peuvent s'aplanir par abrasion. Il en résulte une surface plus lisse, donc plus vulnérable à l'érosion éolienne. Un travail excessif du sol tend à fragmenter la structure du sol et à accroître la vulnérabilité à l'érosion éolienne.

4.3. Climat : La vitesse du vent et la durée des épisodes venteux influencent directement l'intensité sur l'ampleur de l'érosion du sol par le vent, présentent une humidité de surface très faible à la surface des sols excessivement drainés ou durant des périodes de sécheresse, ce qui favorisant le détachement et à être emportées par le vent. Ce phénomène se produit lors de l'assèchement du sol par le gel au cours des mois d'hiver. L'accumulation de particules éoliennes au pied de certains obstacles comme des clôtures, des arbres ou des bâtiments, ou la présence d'une neige teintée de brun durant l'hiver constituent des indicateurs visibles.

4.4. Longueur exposée des champs : En l'absence d'arbres, d'arbustes, de résidus, etc., faisant obstacle au vent, celui-ci met les particules de sol en mouvement sur de grandes distances, ce qui augmente l'abrasion et l'érosion du sol. Comme les buttes et les sommets des collines sont habituellement exposés, ce sont les endroits qui en souffrent le plus.

4.5. Couvert végétal : À certains endroits, l'absence de couvert végétal permanent favorise considérablement à l'érosion éolienne. Les sols dénudés, secs et exposés présentent la plus grande vulnérabilité. Cependant, les cultures qui produisent peu de résidus (telles que le soja et de nombreuses cultures légumières) offrent généralement une protection insuffisante contre le vent. Dans les endroits très venteux, il arrive que même les cultures qui produisent beaucoup de résidus ne protègent pas suffisamment le sol. Le couvert végétal le plus efficace est composé d'une culture de couverture et de plantations brise-vent établies à des endroits stratégiques, combinées à un bon travail du sol, à une bonne gestion des résidus et à un choix approprié de cultures.

4.6. Érosion liée au travail du sol : L'érosion liée au travail du sol entraîne une redistribution du sol par la machinerie et la gravité. Elle amène un déplacement progressif du sol vers le bas des pentes. Cette forme d'érosion prépare le terrain à l'érosion hydrique. Les instruments aratoires déplacent le sol vers des zones de convergence du champ où les eaux de ruissellement se concentrent. De plus, le sous-sol ainsi exposé devient très vulnérable à l'action érosive de l'eau et du vent.

L'érosion liée au travail du sol est la forme d'érosion qui est responsable des plus importants des déplacements de sol à l'intérieur du champ. Dans de nombreux cas, elle peut causer plus d'érosion que des érosions hydrique et éolienne combinées.

4.7. Facteurs Anthropiques

- Déforestation
- Surpâturage
- Pratiques agricoles inadaptées

5. Effets de l'érosion éolienne :

L'érosion éolienne est un des processus les plus Destructeurs de la désertification. Elle entraîne une dégradation environnementale sévère par l'appauvrissement des sols et transport d'importantes quantités de particules par le vent. L'érosion éolienne est le principal facteur physique d'épuisement des terres agricoles et, par l'ensablement, constitue des contraintes majeures dans les aires urbaines et oasiennes des écosystèmes secs, engendrant la pauvreté et la migration pour les populations humaines qui abandonnent leurs terres devenues stériles pour des terres nouvelles ou pour les villes (**Goudie & Middleton, 2006**).

Les agriculteurs et les décideurs politiques, joue, par ses activités et ses aménagements, un rôle essentiel de déclencheur ou d'accélérateur de l'érosion éolienne. Les facteurs anthropiques (déforestation, surpâturage...) sont aggravés par leur superposition avec des phases de sécheresse récurrentes ou des « accidents » pluviométriques (inondations...). Il existe également des facteurs de vulnérabilité à l'érosion éolienne inhérents aux écosystèmes secs, le premier étant les sols minces et sensibles. La sécheresse favorise leur fragilité et Les transformant en poussière facilement emportée.

Les sols sont alors appauvris par un premier processus éolien de vannage des particules sableuses et des fines (argiles, limons, sables fins). Le vent balaie et transporte les particules, le vannage les trie et leur accumulation favorise la formation de nouvelles dunes. La surexploitation par les activités humaines (agriculture et pâturage) conduit à la stérilisation de ces sols déjà pauvres en matière organique.

L'érosion éolienne endommage les cultures en soumettant les plantules ou les plants repiqués à l'abrasion, en enterrant les plants ou les semences et en exposant les semences. Elle peut détruire les cultures, entraînant des retards coûteux, ce qui occasionne des retards coûteux. Elle peut même obliger à reprendre les semis. Les plantes, fragilisées par l'abrasion des particules, deviennent plus sensibles aux maladies, ce qui se traduit par des baisses de rendement, de qualité et de valeur marchande. L'érosion éolienne peut en outre compliquer les travaux aratoires et empêcher de réaliser les travaux à temps.

L'abrasion éolienne appauvrit le sol, réduisant la croissance et les rendements, ce qui peut se répercuter sur la croissance et les rendements dans les parcelles où l'érosion est un problème récurrent. Un vent persistant modifie progressivement la texture du sol. Dans les sols sableux, la perte des particules de matière organique, de sable fin, de limon et d'argile entraîne une baisse de la capacité de rétention d'eau du sol. Cette dégradation accroît l'érodabilité du sol, aggravant le phénomène.

6. Impacts de l'érosion éolienne :

6.1. Environnementaux

- Désertification progressive

- Appauvrissement de la biodiversité

Perte de la fertilité : Enlèvement des particules riches en nutriments. Perte de 25-40 tonnes/ha/an de sol fertile (UNCCD, 2023)

-Formation de dunes : Déplacement massif de sable et création de barrières naturelles.

-Dégradation des infrastructures : Sédimentation sur les routes et dans les canaux.

-Pollution atmosphérique : Particules en suspension affectant la qualité de l'air.

6.2. Économiques

- Baisse des rendements agricoles (jusqu'à 50%)
- Coûts de déblaiement des infrastructures (routes, villes)

6.3. Sociaux

- Migration climatique forcée
- Conflits pour les ressources

7. Mesures de prévention et de contrôle de l'érosion éolienne :

- Pratiques agricoles :

- Plantation de haies brise-vent pour réduire la vitesse du vent.
- Cultures de couverture pour protéger le sol nu.
- Techniques de labour conservateur pour maintenir les résidus végétaux.

- Gestion des terres arides :

- Reboisement et fixation des dunes par des plantes adaptées.
- Aménagement de bandes végétalisées pour ralentir le vent.

- Gestion des sols :

- Augmentation de la matière organique pour stabiliser les particules ;
- Ajout d'eau ou de fixateurs chimiques pour maintenir les sols en place temporairement.

-Techniques de lutte contre l'érosion éolienne :

- La lutte contre la menace éolienne se réalise dans les trois aires suivantes :
- Les aires de départ, où les particules doivent être bloquées ;

-Les aires de transport, où le courant éolien doit être dévié pour éviter l'ensevelissement des infrastructures humaines ;

-Les aires d'accumulation, où il faut fixer le sable vif.

La lutte contre l'érosion éolienne s'organise en deux étapes :

-Replacer le site à protéger dans le système global, régional et local d'action éolienne, en tenant compte du cadre topographique et du type de dune. Cette étape aboutit à l'estimation de la superficie à stabiliser ou à protéger.

-L'étape opératoire vise à réduire la vitesse du vent à la surface du sol, par exemple en augmentant sa rugosité de surface.

Les méthodes de protection utilisées et les normes établies varient selon l'expérience propre de chaque pays, selon les particularités du périmètre traité, la nature et la disponibilité en matériaux locaux, mais aussi selon la stratégie politico-économique établie en fonction des objectifs recherchés. L'évaluation de l'efficacité des techniques de lutte contre l'ensablement est ponctuelle et liée au taux de réussite de chaque opération. Les résultats enregistrés sur le terrain et le niveau de protection assuré aux infrastructures sont, avec le coût, les principaux critères d'appréciation de cette efficacité.

Toutes les méthodes de lutte contre la menace éolienne ont pour objectif de limiter la prise en charge, le transport des particules et de contrôler l'organisation de la distribution du sable lors de son dépôt et de son accumulation et surtout de le fixer sur place :

-Les méthodes de lutte mécanique ont pour objectif de fixer le sable mobilisable et d'empêcher les dépôts sableux sur les infrastructures : palissades, et méthodes aérodynamiques. Ces techniques sont le préalable indispensable à la fixation des sables mobiles et des dunes à court et moyen termes.

-Les méthodes de lutte biologique consistent à développer une couverture végétale permanente : réenherbement, brise-vent, barrières végétales, ceintures boisées, reboisement.

Elles font suite aux techniques mécaniques de stabilisation et de fixation des sables et des dunes, coûteuses, parfois inesthétiques et dont les effets sont temporaires.

La réussite de la mise en œuvre de ces techniques implique la présence d'eau dans le sol à une profondeur accessible aux végétaux ou l'arrosage des plants jusqu'à ce que leur système racinaire atteigne les nappes phréatiques.

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, augmenter la cohésion du matériau face à cette agression.

-Augmenter la cohésion du matériau : L'apport de matières organiques dans les horizons superficiels du sol améliore sa structure. La pulvérisation de déchets pétroliers, d'huile lourde ou de bitume et de déchets de l'industrie plastique (genre de colle diluée) permet d'agglomérer les particules à la surface du sol et donc de les rendre difficilement transportables par le vent.

-Augmenter la rugosité de la surface du sol : Il s'agit de techniques culturales laissant à la surface du sol de grosses mottes ou des billons perpendiculaires à la direction dominante des vents. Ces billons ne doivent pas dépasser 40 cm de haut, sans quoi le vent décoiffe le sommet des billons et accélère l'érosion. Une autre méthode de lutte très efficace consiste à laisser les résidus de cultures sur le champ.

-Augmenter le couvert végétal : On peut également réduire la vitesse du vent en augmentant la densité du couvert végétal. Ceci est évidemment difficile en milieu aride, aussi est-il particulièrement important de veiller à une saine gestion des résidus de culture qu'il faut tenter de maintenir à la surface du sol de façon à augmenter la rugosité du terrain, à protéger la surface du sol plus qu'à être enfouis où ils ne pourront améliorer que légèrement la structure et la résistance à l'agression du vent.

-Les brises-vents : Leur rôle est double : ralentir la vitesse du vent pour réduire l'évaporation et l'érosion éolienne. Leur action - réduire de 20 % la vitesse du vent - s'étend sur dix à douze fois la hauteur du brise-vent en aval et en amont.

Cette protection dépend de la perméabilité du brise-vent. Une faible perméabilité provoque une plus grande réduction de vitesse, mais sur une largeur protégée plus faible.

D'après **Heusch (1988)**, si on réduit trop la vitesse (plantation trop dense), la température s'élève et les plantes grillent le long du brise-vent.

Il vaudrait mieux reconstituer un parc d'une quarantaine d'arbres adultes pour freiner plus régulièrement la vitesse du vent. La disposition optimale comporterait deux rangs d'arbres

élevés, entourés de deux rangs d'arbres bas, soit une bande de dix mètres exploitée par moitié alternativement.

-Fixer les dunes : Il s'agit d'une part d'éteindre la source des sables et d'autre part de fixer les dunes sur place. Pour ce faire, il est fait appel à la fois à la fixation mécanique et biologique.

8. Techniques de Lutte Contre l'Érosion Éolienne

8.1. Méthodes Végétales

- Brise-vent : Réduction de 50-80% de la vitesse du vent
- Couverture végétale permanente
- Bandées enherbées (ratio optimal 1:10)

8.2. Techniques Culturelles

- Semis direct sous couvert
- Culture en courbes de niveau
- Paillage organique (5-10 cm d'épaisseur)

8.3. Ouvrages Mécaniques

- Clayonnage
- Barrières géotextiles
- Stabilisation par liants naturels (biopolymères)

9. Études de Cas

9.1. Projet "Great Green Wall" (Afrique)

- 8 000 km de brise-vents prévus
- 18 millions ha restaurés à ce jour
- 350 000 emplois créés

9.2. Succès en Chine (Kubuqi Desert)

- 6 000 km² stabilisés
- Combinaison de végétation et techniques mécaniques

10. Perspectives Futures

- Développement de systèmes d'alerte précoce
- Utilisation de drones pour le suivi
- Nouvelles espèces végétales résistantes

La lutte contre l'érosion éolienne nécessite une approche intégrée combinant savoirs traditionnels et innovations technologiques. Les solutions durables passent par une gestion adaptative des territoires vulnérables.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

ADEME (2021). *"Gestion des paillis organiques"* (Guide pratique, 2021).

ADEME (2022). Artificialisation des sols en France : chiffres clés et impacts environnementaux. Agence de la transition écologique.

African Union (2023). Great Green Wall Initiative: Progress report 2023.

Arvalis (2021). "Impact des rotations sur la fertilité physique et biologique des sols"

Baker, J.M., Ochsner, T.E., Venterea, R.T., & Griffis, T.J. (2007). "Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know?" **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 118(1-4), 1-5.

Bagnold, R. A. (1941). The physics of blown sand and desert dunes. Methuen.

Baize, D. (2000). Guide des analyses en pédologie. INRA Éditions

Bargaz, A., Lyamlouli, K., Chtouki, M., Zeroual, Y., & Dhiba, D. (2018). "Soil microbial resources for improving fertilizers efficiency in an integrated plant nutrient management system." *Frontiers in Microbiology*, 9, 1606.

Bashagaluke, J. B., Logah, V., Opoku, A., Sarkodie-Addo, J., & Quansah, C. (2018). "Soil nutrient loss through erosion: Impact of different cropping systems and soil amendments in Ghana." *PLOS ONE*, 13(12), e0208250.

Batey, T. (2009). "Soil compaction and soil management—A review." *Soil Use and Management*, 25(4), 335-345.

Bernal, M.P., Alburquerque, J.A., & Moral, R. (2017). "Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment." *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453.

Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2008). No-tillage and soil-profile carbon sequestration: An on-farm assessment. *Soil Science Society of America Journal*, 72(3), 693-701.

Blanco-Canqui, H., Shaver, T.M., Lindquist, J.L., Shapiro, C.A., Elmore, R.W., Francis, C.A., & Hergert, G.W. (2017). "Cover crops and ecosystem services: Insights from studies in temperate soils." *Agronomy Journal*, 107(6), 2449-2474.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). The Nature and Properties of Soils (14e éd.). Pearson Prentice Hall.

Brevik, E.C., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J.N., Six, J., & Van Oost, K. (2015). "The interdisciplinary nature of soil." *Soil*, 1(1), 117-129.

Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). "Soil structure and management: A review." *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.

- Cammarano, D., Ceccarelli, S., Grando, S., Romagosa, I., & Benbelkacem, A. (2019).** "The impact of climate change on barley yield in the Mediterranean basin." *European Journal of Agronomy*, 106, 1-11.
- Chen, H., Zhang, W., Gilliam, F.S., & Wang, Q. (2017).** "Changes in soil carbon sequestration in *Pinus massoniana* forests along an urban-to-rural gradient." *Forest Ecology and Management*, 395, 81-90.
- Cherr, C.M., Scholberg, J.M.S., & McSorley, R. (2006).** "Green manure approaches to crop production." *Agronomy Journal*, 98(2), 302-319.
- Chepil, W. S. (1953).** "Factors that influence clod structure and erodibility of soil by wind: I. Soil texture." *Soil Science*, 75(6), 473-483.
- Chepil, W. S., & Woodruff, N. P. (1963).** "The physics of wind erosion and its control." *Advances in Agronomy*, 15, 211-302.
- Corwin, D.L., & Lesch, S.M. (2005).** "Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture." *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3), 11-43.
- Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S.J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R.K. (2014).** "Changes in the global value of ecosystem services." *Global Environmental Change*, 26, 152-158.
- Crews, T.E., & Peoples, M.B. (2004).** "Legume versus fertilizer sources of nitrogen: ecological tradeoffs and human needs." *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 102(3), 279-297.
- Dabney, S.M., Delgado, J.A., & Reeves, D.W. (2006).** "Using winter cover crops to improve soil and water quality." *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 32(7-8), 1221-1250.
- Derpsch, R., Friedrich, T., Kassam, A., & Hongwen, L. (2010).** "Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 3(1), 1-25.
- Dominati, E., Patterson, M., & Mackay, A. (2010).** "A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils." *Ecological Economics*, 69(9), 1858-1868.
- Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (1996).** *Biology and Ecology of Earthworms* (3e éd.). Chapman & Hall.
- ELD Initiative (2015).** *The Economics of Land Degradation in Africa: Benefits of Action Outweigh the Costs*. United Nations University.
- Eswaran, H., & Reich, P. F. (2001).** "Land degradation: An overview." In *Responses to Land Degradation* (pp. 20-35). CRC Press.
- FAO (2015).** *Status of the World's Soil Resources*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2016).** *Gabion structures for erosion control: Design and implementation*.

- FAO (2017).** Guidelines for gully stabilization and rehabilitation.
- FAO (2017)** "*Mulching for Soil and Water Conservation*" (2017).
- FAO (2018).** Windbreaks and shelterbelts for soil conservation.
- FAO (2019).** Soil erosion: The greatest challenge for sustainable soil management.
- FAO (2019).** Terracing manual for sustainable agriculture.
- FAO (2020).** Global Forest Resources Assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2020).** Species selection for windbreaks in drylands.
- FAO (2021).** Global assessment of wind erosion and its impacts.
- FAO (2021).** Soil erosion control: Best practices.
- FAO (2021).** The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2022).** Global Assessment of Soil Degradation. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO (2022).** The impact of soil erosion on global food security.
- FAO (2022).** Windbreaks and shelterbelts: Design and management.
- Garritty, D.P., Akinnifesi, F.K., Ajayi, O.C., Weldesemayat, S.G., Mowo, J.G., Kalinganire, A., ... & Bayala, J. (2010).** "Evergreen Agriculture: a robust approach to sustainable food security in Africa." *Food Security*, 2(3), 197-214.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V.I. (2010).** "Precision agriculture and food security." *Science*, 327(5967), 828-831.
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006).** Desert dust in the global system. Springer.
- Guo, J.H., Liu, X.J., Zhang, Y., Shen, J.L., Han, W.X., Zhang, W.F., ... & Zhang, F.S. (2019).** "Significant acidification in major Chinese croplands." *Science*, 327(5968), 1008-1010.
- Hamza, M.A., & Anderson, W.K. (2005).** "Soil compaction in cropping systems." *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-145.
- Heusch, B. (1988).** "La lutte contre l'érosion éolienne dans les zones arides." *Cahiers ORSTOM, Série Pédologie*, 24(2), 145-160.
- Horn, R., Fleige, H., Richter, F.H., & Czyz, E.A. (2020).** "Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment." *Soil and Tillage Research*, 146, 1-15.
- Hudson, B. D. (1994).** "Soil organic matter and available water capacity." *Journal of Soil and Water Conservation*, 49(2), 189-194.
- INRAE (France) (2020).** "*Travail du sol et durabilité des systèmes de culture*" .

INRAE (2020). *"Le paillage en agriculture : impacts agronomiques et environnementaux"* .

Insam, H. (2001). "Developments in soil microbiology since the mid-1960s." *Geoderma*, 100(3-4), 389-402.

IPBES (2018). The IPBES Assessment Report on Land Degradation and Restoration. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.

IPCC (2019). Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.

Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A.C., van Groenigen, J.W., Hungate, B.A., & Verheijen, F. (2017). "Biochar boosts tropical but not temperate crop yields." *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001.

Jose, S. (2009). "Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits." *Adances in Agroforestry*, 7, 1-10.

Kader, M. A., Senge, M., Mojid, M. A., & Ito, K. (2017). "Recent advances in mulching materials and methods for modifying soil environment." *Soil and Tillage Research*, 168, 155-166.

Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R., & Kienzle, J. (2019). "Overview of the worldwide spread of conservation agriculture." *Field Crops Research*, 183, 56-68.

Kay, B.D., Angers, D.A., Groenevelt, P.H., & Baldock, J.A. (2019). *Soil Structure and Organic Matter: Summary of Present Knowledge and Future Research Directions*. CRC Press.

Lal, R. (2004). "Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security." *Science*, 304(5677), 1623-1627.

Lal, R. (2020). "Soil erosion and carbon dynamics." *Soil and Tillage Research*, 81(1), 1-16.

Lal, R., & Stewart, B. A. (1990). "Soil degradation: A global threat." *Advances in Soil Science*, 11, 129-172.

Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., ... & Rossi, J. P. (2006). "Soil invertebrates and ecosystem services." *European Journal of Soil Biology*, 42, S3-S15.

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Routledge.

Magdoff, F., & Van Es, H. (2021). *Building Soils for Better Crops* (4e éd.). Sustainable Agriculture Research and Education (SARE).

Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., ... & Winowiecki, L. (2017). "Soil carbon 4 per mille." *Geoderma*, 292, 59-86.

Morgan, R.P.C. (2005). *Soil Erosion and Conservation*. Blackwell Publishing.

Nair, P.K.R., Kumar, B.M., & Nair, V.D. (2010). "Agroforestry as a strategy for carbon sequestration." *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172(1), 10-23.

- Orgiazzi, A., Bardgett, R. D., & Barrios, E. (2016).** Global soil biodiversity atlas. European Commission.
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2004).** "Soil structure and the effect of management practices." *Soil and Tillage Research*, 79(2), 131-143.
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., ... & Alewell, C. (2015).** "The new assessment of soil loss by water erosion in Europe." *Environmental Science & Policy*, 54, 438-447.
- Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., & Cassman, K.G. (2016).** "Does conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems?" *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 220, 164-174.
- Qadir, M., Quill  rou, E., Nangia, V., Murtaza, G., Singh, M., Thomas, R.J., ... & Noble, A.D. (2014).** "Economics of salt-induced land degradation and restoration." *Natural Resources Forum*, 38(4), 282-295.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C. (1997).** Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA Agriculture Handbook No. 703.
- Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G.J. (2017).** "Soil carbon debt of 12,000 years of human land use." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9575-9580.
- Scalenghe, R., & Marsan, F.A. (2009).** "The anthropogenic sealing of soils in urban areas." *Landscape and Urban Planning*, 90(1-2), 1-10.
- Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., & Denef, K. (2004).** "A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics." *Soil and Tillage Research*, 79(1), 7-31.
- Stevenson, F. J. (1994).** *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions* (2e   d.). Wiley.
- Tisdall, J. M., & Oades, J. M. (1982).** "Organic matter and water-stable aggregates in soils." *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163.
- UNCCD (2019).** Global Land Outlook. United Nations Convention to Combat Desertification.
- UNCCD (2021).** Success stories in land restoration: The Great Green Wall initiative.
- UNCCD (2023).** Global land outlook: Addressing wind erosion and land degradation.
- UNEP (2020).** Global environment outlook: Land degradation and restoration.
- UNEP (2022).** Global wind erosion risk map.
- USDA (2020).** Wind erosion processes and control measures. Agriculture Handbook No. 720.
- USDA (2021).** National Resources Inventory: Soil Erosion on Cropland. United States Department of Agriculture.

Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., ... & Sanginga, N. (2010). "Integrated soil fertility management: Operational definition and consequences for implementation and dissemination." *Outlook on Agriculture*, 39(1), 17-24.

Wall, D.H., Bardgett, R.D., & Kelly, E. (2015). "Biodiversity in the dark." *Nature Geoscience*, 8(2), 89-96.

West, T. O., & Post, W. M. (2002). "Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis." *Soil Science Society of America Journal*, 66(6), 1930-1946.

World Agroforestry Centre (2019). Vetiver grass for slope stabilization: Technical guidelines.

World Agroforestry (2022). Multifunctional windbreaks: Design and benefits.

World Bank (2021). Investing in land restoration: Economic benefits of erosion control.*

World Bank (2021). The economic costs of wind erosion: Case studies from Africa and Asia.

Zobeck, T. M., & Van Pelt, R. S. (2003). "Wind erosion." In *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 1752-1756). Marcel Dekker.

Webographie

(Site1) : www.futura-sciences.com

(Site2) : https://r.search.yahoo.com/_ylt=AwrigY_uGmhoCowE6ByjzbfK;_ylu=c2VjA2ZwLWF0dHJpYgRzbGsDcnVybA-RV=2/RE=1751681902/RO=11/RU=https%3a%2f%2fpdfprof.com%2fPDF_Image.php%3fidt%3d46126%26t%3d17/RK=2/RS=agQq_RZCS8.EpgGoEZ0VFvqmdck-

(Site 3): <https://www.agro-league.com/agriculture-de-conservation/tcs-technique-culture-simplifiee>

(Site 4) : tpdomain.com

(Site 5) : www.lacompagniedesforestiers.com

(Site 6) : www.alamyimages.fr

(Site 7) : www.aquaportail.com

(Site 8): www.greelane.com

(Site 9) : www.linternaute.com

(Site 10) : fr.freepik.com

(Site 11) : agritrop.cirad.fr

(Site 12) : www.agro-league.com

(Site 13) : www.agro-league.com

(Site 14) fr.freepik.com

(Site 15): wiki.tripleperformance.fr

(Site 16): Edwards, 2004 - Soil Biology & Biochemistry

(Site 17): www.alamyimages.fr

(Site 18): fr.wikipedia.org