

Chapitre 1 : Procédés de conservation des sols

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**).

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**).

- 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**).

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**).

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**).

Rôle du carbone organique :

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

Conséquences :

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

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 microbiologique 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.

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%

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.

B. Techniques mécaniques

Travail suivant les courbes de niveau

Les approches mécaniques complètent ces méthodes culturelles. 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**). .

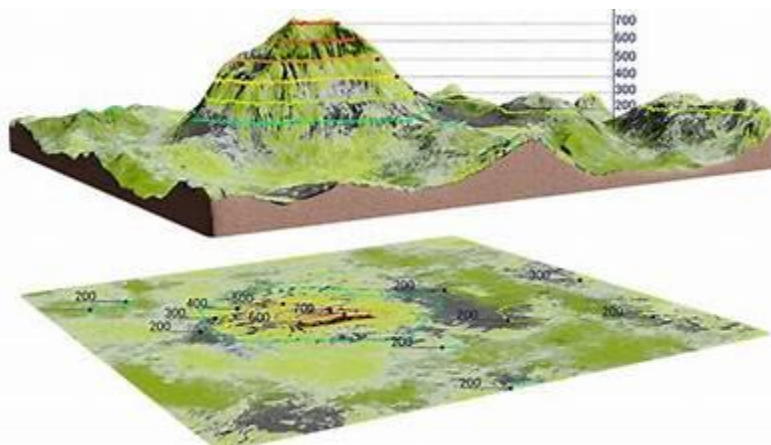


Figure. 3 : les courbes de niveaux (Site 4)

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)

Les systèmes agroforestiers combinent :

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

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**)

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

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

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

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

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 sous-tend 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

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, Hévée, 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 phytocéologiques 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

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)

3.4. 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.