

Université Abbes Laghrour Khenchela

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques

Polycopié de la Matière :

AGRONOMIE I :

EAU ET SOL

Destiné au 2^{ème} Année Licence en

Sciences Agronomiques

Objectif :

L'étudiant doit savoir les notions et la terminologie de l'eau et des différents sols, mode d'étude et d'analyse en corrélation avec les différents agrosystèmes et écosystèmes

Dr. Laïche AOUIDANE

Maître de Conférences Classe A

Préface

L'agronomie, science clé pour une gestion durable des ressources naturelles, est au cœur des enjeux actuels liés à la sécurité alimentaire et à la préservation de l'environnement. L'eau et le sol, deux éléments fondamentaux de l'agriculture, sont au centre de nombreuses problématiques et nécessitent une compréhension approfondie pour garantir un développement agricole respectueux de l'environnement et des générations futures.

Ce polycopié de cours est destiné aux étudiants de deuxième année en sciences agronomiques, et plus particulièrement à ceux qui s'intéressent aux fondamentaux de l'agronomie, de l'eau et des sols. L'objectif de ce cours est de vous fournir une compréhension approfondie des principes de base qui régissent les interactions entre le sol, l'eau et les pratiques agricoles. Ainsi, le programme s'articule autour des concepts théoriques et des applications des connaissances acquises, afin de poser les bases nécessaires à une approche scientifique des systèmes agricoles.

L'eau et le sol sont des ressources naturelles essentielles pour l'agriculture. Cependant, la gestion de ces ressources est complexe, nécessitant une compréhension rigoureuse de leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques de ces deux ressources. Ce polycopié met l'accent sur les notions fondamentales liées aux cycles de l'eau, à la composition et à la structure des sols, ainsi qu'aux principes de leur gestion durable dans un cadre agricole, dans le cadre de donner une vision globale sur l'importance de ces ressources dans le développement de l'agriculture.

Dans cette matière des travaux dirigés (TD) sont programmé et proposés dans ce polycopié sont conçus pour vous permettre de renforcer vos connaissances théoriques et de les appliquer à des situations concrètes à travers des exercices pratiques et des études de cas. Ils vous aideront à analyser des problématiques agricoles liées à la gestion de l'eau et des sols, en vous apportant les outils nécessaires pour résoudre des situations complexes dans le cadre de votre future pratique professionnelle.

Bien que ce cours n'inclue pas de travaux pratiques (TP) ou de mise en situation sur le terrain, il est essentiel de saisir l'importance des connaissances théoriques en agronomie, car elles servent de fondation à toute action sur le terrain. L'objectif est de vous fournir des clés de réflexion qui vous permettront de comprendre les dynamiques des sols et de l'eau dans un

contexte agricole et d'appliquer ces connaissances à des solutions concrètes et adaptées à des problématiques locales et mondiales.

Nous vous encourageons à aborder ce cours avec rigueur et curiosité. L'acquisition des bases théoriques et des concepts présentés ici vous sera utile tout au long de votre parcours académique et professionnel, et vous ouvrira la voie vers une gestion plus durable des ressources agricoles essentielles.

« Pour un avenir agricole durable, la gestion intégrée et responsable des sols et de l'eau est essentielle. Il s'agit de préserver la fertilité des sols, d'optimiser l'utilisation de l'eau, et de s'adapter aux défis du changement climatique, tout en respectant la biodiversité et en intégrant les sciences écologiques et agronomiques dans des solutions locales et globales. » (Lal & Stewart, 2012).

Bonne lecture et bon apprentissage.

Programme de Canevas

Semestre: 4^{ème} Semestre

UE : Unité d'Enseignement Fondamentale 1

Matière 1: Agronomie I (Eau, Sol)

Objectifs de l'enseignement

L'étudiant doit savoir les notions et la terminologie de l'eau et des différents sols, mode d'études et d'analyses en corrélations avec les différents écosystèmes.

Connaissances préalables recommandées (*descriptif succinct des connaissances requises pour pouvoir suivre cet enseignement – Maximum 2 lignes*).

Sans pré-requis

Contenu de la matière

1. Introduction
 - Définition du sol et le
 - Rôle de l'eau en Sciences du sol

A- Le Sol

2. **Eléments constitutifs du sol**
 - Constituants minéraux
 - Constituants organiques
 - Complexes colloïdaux
3. **Organisation morphologique des sols**
 - Organisations élémentaires
 - Horizon pédologique
 - Profils pédologiques
 - Couverture pédologique

- Sol et eau
- Atmosphère du sol
- Température du sol
- Couleur du sol

4. Propriétés chimiques et biologiques du sol

- Phénomènes d'échanges des ions
- Propriétés électro-ioniques du sol
- Organismes du sol
- Transformations d'origine microbienne

5. Classification des sols (Notions)

- Les différentes classifications (Russe, Américaine, Française)
- Aperçu sur les sols d'Algérie et leurs relations avec le climat et la géomorphologie.

B- L'eau

- Rôle de l'eau du sol.
- Relations entre les trois phases du sol.
- Mesure des volumes occupés par les différentes phases du sol.
- Les formes de l'eau dans le sol.
- Les forces de rétention de l'eau par le sol.
- Les états de l'eau dans le sol.
- Le potentiel de l'eau dans le sol.
- Les mouvements de l'eau dans le sol.
- Bilan de l'eau dans le sol.
- Besoin en eau des végétaux.

Travaux dirigés :

TD N°1 : Relations entre les unités de mesure utilisées en sciences des sols (Rappel et exercices sur les méthodes de préparation des solutions d'analyse ; exercice de conversion des unités).

TD N°2 : Exercices sur l'aspect physique du sol (système à trois phases)

TD N°3 : Séance de projection de diapositives (les différents sols des classifications CPCS et USDA).

Mode d'évaluation

Control continu et examen semestriel

Références (*Livres et photocopiés, sites internet, etc*) :

1. LIM H., 1982- Agronomie moderne. Base physiologique et agronomique de la production végétale. Ed. Masson.
2. DUCHAUFOR P., 1994- Pédologie, sol, végétation, environnement. Ed. Masson.
3. BLONDEL J., 1979- Biogéographie et écologie. Ed. Masson

Listes des Tableaux

TABLEAU 1. EVALUATION DE L'IMPACTE DES VERS DE LA TERRE SUR LES CONSTITUTIONS DES SOLS ARABLES (CLUZEAU & PERES, 2004).	28
TABLEAU 2. REPARTITION DES PARTICULES DU SOL PAR TAILLE AVEC UN ECHELLE GRANULOMETRIQUE.....	31
TABLEAU 3. IMPORTANCE ET INTERPRETATION DES VALEURS DE CEC DES SOLS	71
TABLEAU 4. INTERPRETATION DES VALEURS DE LA SALINITE (CE) DES SOLS.....	73

Liste des Figures

FIGURE 1. FORMATION DU SOL PAR ALTERATION ET ACTIVITE BIOLOGIQUE DE LA ROCHE MERE.	20
FIGURE 2. FORMATION ET EVOLUTION ORGANIQUE ET MINERALE DU SOL	21
FIGURE 3. SCHEMA DE L'EVOLUTION D'UN SOL A PARTIR DE LA ROCHE-MERE. (ARCHAMBEAUD & THOMAS, 2022).....	21
FIGURE 4. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN VOLUME DE SOL.	22
FIGURE 5. PRESENTATION DE TROIS TYPE DU SOL SABLEUX; LIMONEUX ET ARGILEUX.....	23
FIGURE 6. LA MATIERE ORGANIQUE DU SOL ; PROPORTION INDICATIVE EN MASSE (CALVET, CHENU, & HOUOT, 2011).....	25
FIGURE 7. EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET FORMATION DE L'HUMUS	26
FIGURE 8. SCHEMA D'EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE ET CES PRODUITS (ACIDE FULVIQUE ET ACIDE HUMIQUE)	27
FIGURE 9. PRESENTATION DE LA CLASSIFICATION DE LA FAUNE DU SOL.....	29
FIGURE 10. PRESENTATION DE DIFFERENTES TEXTURES DU SOL (SABLE, LIMON ET ARGILE) ...	32
FIGURE 11. METHODE DE DETERMINATION DE LA GRANULOMETRIE PAR PIPETTE DE ROBINSON	33
FIGURE 12. IDENTIFICATION DE TEXTURE DES SOLS PAR LE TRIANGLE TEXTURAL (DUCHAUFOR, 1997).	34
FIGURE 13. LES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURE DU SOL AVEC EXPLICATION (BROWN, BISWAS, CARON, DYCK, & SI, 2024).	37
FIGURE 14. PRESENTATION DU COMPLEXE COLLOÏDAL (ARGILO-HUMIQUE) DU SOL	38
FIGURE 15. PRESENTATION UNE VARIABILITE DES COULEURS DU SOL ET IDENTIFICATION PAR LA CHART DES COLOR DU SOL MUNSELL	43
FIGURE 16. PRESENTATION SCHEMATIQUE DES PORES DU SOL	47
FIGURE 17. PHOTO PRESENTATIVE SUR L'IMPACT DES SOLS COMPACTE SUR LA PERMEABILITE DE L'EAU	49
FIGURE 18. PHOTOS PRESENTATIVES DE QUELQUES NODULES ET REVETEMENTS PEDOLOGIQUE (GEBHARDT, OCCHIETTI, & FECHNER, 2014).....	51

FIGURE 19. SCHEMA PRESENTATIF DE L'ACTIVITE BIOLOGIQUE ET SON IMPACT SUR LA FERTILITE DES SOLS.	56
FIGURE 20. PRESENTATION DE DIFFERENTS HORIZONS DU SOL AVEC PROCESSUS DE FORMATION	57
FIGURE 21. REALISATION D'UN PROFIL PEDOLOGIQUE DANS UN SOL	63
FIGURE 22. EXEMPLE DE LA RELATION ENTRE LA PROFONDEUR ET LES TEMPERATURES ANNUELLES DU SOL.....	67
FIGURE 23. VARIATION ANNUELLE DES TEMPERATURES DU SOL.....	67
FIGURE 24. IMPACT DE VALEUR DE PH SUR LA DISPONIBILITE DES ELEMENTS POUR LES PLANTS	70
FIGURE 25. MESURE DE LA SALINITE DES SOLS (CE) EN LABORATOIRE PAR LA METHODE MAGNETIQUE	74
FIGURE 26. SCHEMA PRESENTATIF DE NUTRIMENTS DU SOL POUR UNE BONNE CROISSANCE DES PLANTES.....	76
FIGURE 27. EXEMPLE SCHEMATIQUE D'UN COMPLEXE ADSORBANT DU SOL ET ECHANGE IONIQUES.....	81
FIGURE 28. VARIATION DE POTENTIEL REDOX DU SOL ET SONT INFLUENCES SUR DIFFERENTS ORGANISME.....	82
FIGURE 29. SCHEMA PRESENTATIF DE CYCLE DE L'EAU.....	86
FIGURE 30. IMPACT DE CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU ET LE CYCLE DE L'EAU (UNESCO , 2020).....	90
FIGURE 31. CARTE DE REPARTITION DU STRESS HYDRIQUE A L'ECHELLE MONDIALE (UNESCO , 2020).	91
FIGURE 32. LES DIFFERENTES FORMES DE L'EAU DANS LE SOL	92
FIGURE 33. METHODE DE DOUBLES ANNEAUX POUR MESURER L'INFILTRATION DE L'EAU DANS LE SOL.....	96
FIGURE 34. SCHEMA PRESENTATIF DES RESERVES D'EAU DANS LE SOL.	99
FIGURE 35. SCHEMA DU SYSTEME SOL, PLAN ET CLIMAT (ARVALIS, 2021).	100
FIGURE 36. LES RESERVES D'EAU DANS LES SOLS PAR APPORT A LA TEXTURE	100
FIGURE 37. SCHEMA EXPLICATIF DE PHENOMENE D'EVAPORATION ET D'EVAPOTRANSPIRATION ET PERTE D'EAU.	103
FIGURE 38. PRESENTATION DE MECANISME D'ABSORPTION D'EAU ET MINERAUX CHEZ LES PLANES.....	105

FIGURE 39. IRRIGATION DE SURFACE PAR INONDATION ET PAR REGOLE.....	110
FIGURE 40. IRRIGATION DE SURFACE PAR ASPERSION ET GOUTTE A GOUTTE.....	110
FIGURE 41. TECHNIQUE D'INFILTRATION ET UTILISATION DES EAUX DE PLUIE	112
FIGURE 42. GESTION DE L'EAU DE PLUIE POUR DES FINS AGRICOLE.....	113
FIGURE 43. GESTION DE L'IRRIGATION PAR L'INTEGRATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE	115

Table des matières

Préface	1
Programme de Canevas	3
Listes des Tableaux	6
Liste des Figures	7
Table des matières	10
Introduction	14
A. LE SOL	19
A.1. PROCESSUS DE PEDOGENESE	19
A.1.1. ALTERATION DE LA ROCHE MERE	19
A.1.2. ACCUMULATION DE MATIERE ORGANIQUE	19
A.1.3. MECANISMES DE LESSIVAGE ET DE TRANSLOCATION	20
A.1.4. INFLUENCE DU CLIMAT ET DE LA BIOLOGIE	20
A.1.5. TEMPS.....	21
A.2. ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS DU SOL	22
A.2.1. CONSTITUANTS MINÉRAUX.....	22
A.2.1.1 Sables.....	22
A.2.1.2 Limons.....	23
A.2.1.3 Argiles	23
A.2.2. CONSTITUANTS ORGANIQUES	24
A.2.2.1 La Matière Organique (MO) du Sol.....	24
A.2.2.2 L'Humus	25
A.2.2.3 Les Substances Organiques Solubles	26
A.2.2.4 Les Micro-organismes du Sol	27
A.2.2.5 Les Macro-organismes du Sol	28
A.2.2.6 Rôle global des constituants organiques.....	30

A.2.3.	LES PROPRIETES PHYSIQUES DU SOL	30
A.2.3.1	La Texture du sol.....	30
A.2.3.2	La Structure du sol	34
A.2.3.3	Complexe colloïdal (Complexe argilohumique).....	37
A.3.	ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DES SOLS	40
A.3.1.	ORGANISATIONS ELEMENTAIRES	40
A.3.1.1	L'interprétation des couleurs	40
A.3.1.2	L'interprétation des agrégats	43
A.3.1.3	L'interprétation des vides.....	46
A.3.1.4	L'interprétation des traits pédologique	50
A.4.	LES HORIZONS PEDOLOGIQUES	56
A.4.1.	HORIZON O (OU HORIZON ORGANIQUE).....	57
A.4.2.	HORIZON A (OU HORIZON SUPERFICIEL)	58
A.4.3.	HORIZON E (OU HORIZON D'ELUVIATION).....	58
A.4.4.	HORIZON B (OU HORIZON D'ILLUVIATION).....	59
A.4.5.	HORIZON C (OU HORIZON SUBSTRATUM)	59
A.5.	PROFILS PEDOLOGIQUES.....	60
A.5.1.	UTILISATION ET IMPORTANCE DU PROFIL PEDOLOGIQUE.....	60
A.5.2.	REALISATION D'UN PROFIL PEDOLOGIQUE.....	61
A.5.2.1	Choisir un site d'étude.....	61
A.5.2.2	Préparer les outils nécessaires	61
A.5.2.3	Creuser le profil pédologique	61
A.5.2.4	Décrire les horizons du profil pédologique	62
A.5.2.5	Échantillonnage et analyses en laboratoire	63
A.6.	COUVERTURE PEDOLOGIQUE	63
A.6.1.	CLASSIFICATION DE LA COUVERTURE PEDOLOGIQUE	64
A.6.2.	CARTOGRAPHIE DE LA COUVERTURE PEDOLOGIQUE	64
A.6.2.1	Méthodes pour réaliser une couverture pédologique	65
A.6.2.2	Importance de la couverture pédologique.....	65
A.7.	LA TEMPERATURE DU SOL	66
A.7.1.	EFFETS DE LA TEMPERATURE DU SOL SUR LES PROCESSUS PEDOLOGIQUES	68
A.8.	PROPRIETES CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES DU SOL	69
A.8.1.	PROPRIETES CHIMIQUES DU SOL.....	69
A.8.1.1	Le pH du sol	69

A.8.1.2	Capacité d'échange cationique (CEC)	70
A.8.1.3	Conductivité électrique (CE)	72
A.8.1.4	Sols et éléments nutritifs	75
A.8.1.5	Le Calcaire du Sol	77
A.8.2.	LE COMPLEXE ABSORBANT	79
A.8.2.1	Composants du Complexe Adsorbant	79
A.8.2.2	Échange Ionique et Mécanismes	80
A.8.2.3	Impact sur la Fertilité du Sol et les Cultures	80
A.8.3.	LE POTENTIEL D'OXYDO-REDUCTION	82
A.8.3.1	Principe de Base du Potentiel d'Oxydo-Réduction (Eh)	83
A.8.3.2	Les facteurs influencent Eh.....	83
A.8.3.3	L'influence de l'aération et le niveau d'oxydo-réduction sur l'évolution des sols	84
A.8.3.4	Conséquences du Potentiel d'Oxydo-Réduction sur la Disponibilité des Nutriments	84

B. L'EAU86

B.1.	LE CYCLE DE L'EAU.....	86
B.1.1.	LES COMPOSANTES DU CYCLE DE L'EAU	86
B.1.1.1	L'Évaporation	86
B.1.1.2	La Transpiration	87
B.1.1.3	La Précipitation	87
B.1.1.4	L'Infiltration	87
B.1.1.5	Le Ruissellement	87
B.1.1.6	L'Évaporation et la Sublimation	87
B.1.1.7	Le Stockage de l'Eau	87
B.1.1.8	Le Cycle de l'Eau : Interactions et Processus	88
B.1.1.9	Le Cycle de l'Eau et l'Agriculture.....	88
B.1.1.10	Impact du Changement Climatique sur le Cycle de l'Eau	89
B.2.	L'EAU DANS LE SOL.....	91
B.2.1.	LES PROPRIETES DE L'EAU DANS LE SOL	92
B.2.1.1	L'Eau Gravité	92
B.2.1.2	L'Eau Capillaire.....	93
B.2.1.3	L'Eau Hygroscopique.....	94
B.2.1.4	L'Eau Saturé	94

B.2.2.	LE MOUVEMENT DE L'EAU DANS LE SOL.....	94
B.2.2.1	Infiltration	95
B.2.2.2	Capacité de Rétention d'Eau.....	96
B.2.2.3	Évapotranspiration et Perte d'Eau.....	101
B.2.3.	ABSORPTION RACINAIRE DE L'EAU	104
B.2.3.1	Phases de l'Absorption Racinaire.....	104
B.2.4.	FACTEURS INFLUENÇANT LES BESOINS EN EAU DES PLANTES	105
B.2.4.1	Facteurs Environnementaux.....	105
B.2.4.2	Facteurs du Sol.....	106
B.2.4.3	Facteurs Biotiques et de Gestion.....	107
B.2.4.4	Interactions Entre Les Facteurs	107
B.3.	GESTION DE L'EAU EN AGRICULTURE	108
B.3.1.	IMPORTANCE DE LA GESTION DE L'EAU EN AGRICULTURE	108
B.3.2.	PRATIQUES DE GESTION DE L'EAU EN AGRICULTURE.....	108
B.3.3.	METHODES D'IRRIGATION.....	109
B.3.3.1	Irrigation de surface (par gravité).....	109
B.3.4.	GESTION DE L'EAU DE PLUIE.....	111
B.3.4.1	Collecte de l'Eau de Pluie.....	112
B.3.4.2	Infiltration et Réutilisation de l'Eau de Pluie	112
B.3.4.3	Gestion de l'Eau de Pluie pour l'Irrigation	113
B.3.4.4	Gestion des Risques d'Inondation et d'Érosion	113
B.3.4.5	Préservation de la Qualité de l'Eau.....	114
B.3.4.6	Technologies d'Irrigation Intelligente.....	114
	Références	116

Introduction

L'eau et le sol sont deux ressources naturelles essentielles qui jouent un rôle primordial dans la vie sur Terre, particulièrement dans le domaine de l'agriculture. Ces ressources, à la fois distinctes et interconnectées, sont indispensables pour la croissance des plantes, la production alimentaire et la régulation des écosystèmes. Le sol, en tant que support de vie pour les végétaux, et l'eau, en tant qu'élément clé dans les processus biologiques et chimiques, sont au cœur de la durabilité des systèmes agricoles. Cependant, leur gestion appropriée devient de plus en plus cruciale face aux défis environnementaux actuels, tels que le changement climatique, la dégradation des sols et la pénurie d'eau. Ce document vise à explorer en profondeur ces deux ressources naturelles, leurs interactions, et les enjeux associés à leur gestion (FAO, 2023).

Définitions Sol

Le sol est le matériel plus ou moins friable où les plantes, au moyen de leurs racines, trouvent leur nourriture et leurs autres conditions de croissance (Hilcard, 1914).

Le sol est la partie superficielle meuble de l'écorce terrestre, considérée habituellement sur une épaisseur maximale de 1,25 m (Baize, 2021).

Le sol peut être défini comme un corps naturel composé de minéraux, de matière organique, d'air et d'eau, qui permet de soutenir la vie végétale. Il est la couche superficielle de la croûte terrestre et joue un rôle primordial dans l'absorption et la rétention de l'eau, dans la fourniture de nutriments aux plantes et dans la régulation des cycles biogéochimiques (Brady & Weil, 2017). Le sol est aussi un réservoir de carbone et un acteur clé dans la régulation du climat terrestre (FAO, 2015). Il joue ainsi un rôle fondamental dans la croissance des plantes, la filtration de l'eau et la régulation de l'environnement.

Définition de l'eau

En peut donner différentes définitions d'après le contexte :

Dans le contexte général de l'eau : L'eau est un liquide incolore, inodore et insipide qui constitue environ 70 % de la masse des organismes vivants et couvre une grande partie de la surface terrestre. Elle est essentielle à la vie, intervenant dans divers processus biologiques, chimiques et physiques, notamment la photosynthèse, la thermorégulation et le transport des nutriments (FAO, 2024).

Dans le contexte Hydrologique : L'eau est une ressource naturelle indispensable, qui circule à travers différents compartiments de la Terre (atmosphère, hydrosphère, lithosphère) par le biais du cycle de l'eau, qui comprend des processus tels que l'évaporation, la condensation, la précipitation et l'infiltration. L'eau douce représente seulement 2,5 % de l'ensemble des réserves d'eau de la planète, avec une grande partie concentrée dans les glaciers et les calottes polaires (Gleick, 1993).

Dans le contexte biochimique : L'eau est une molécule constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène (H₂O), qui possède des propriétés uniques de solvabilité. Cela en fait un solvant universel, capable de dissoudre une large gamme de substances, et elle joue un rôle crucial dans de nombreux processus biochimiques, y compris le métabolisme des cellules vivantes (Nelson & Cox, 2008).

Dans le contexte de gestion des ressources en eau : L'eau est une ressource naturelle renouvelable qui, bien que présente en grande quantité sur Terre, est limitée et souvent mal répartie. Elle est essentielle non seulement pour la vie humaine et animale, mais aussi pour l'agriculture, l'industrie et les écosystèmes. Sa gestion durable est devenue une priorité mondiale, surtout dans les zones sujettes à des pénuries d'eau (Kundzewicz, 2013).

Dans le contexte de l'agriculture : L'eau en agriculture désigne la quantité d'eau nécessaire pour irriguer les cultures, maintenir l'humidité du sol et soutenir les processus physiologiques des plantes, notamment la photosynthèse. Elle est un élément clé de la productivité agricole, influençant directement les rendements des cultures et la durabilité des systèmes agricoles (Einhorn & Peterson, 2009).

Le sol est la formation naturelle de surface à structure meuble et d'épaisseur variable résultant de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques.

Le sol est un milieu dynamique qui évolue au cours du temps. $S = f(Cl, o, r, p, t)$ où : Cl = Climat ; o = Organismes vivants ; r = Topographie ; p = Roche mère ou matériel parental ; t = Temps.

La roche-mère ou matériel parental est le dépôt géologique qui a donné naissance au sol. Cependant, une même roche mère peut donner naissance à plusieurs types de sols dans l'espace et dans le temps. C'est pourquoi on distingue :

- La roche mère géologique ou le substrat ; son altération donne naissance au dépôt meuble sur lequel s'est fixée la végétation ;
- La roche mère pédologique ou le produit plus ou moins meuble de l'altération superficielle. Une même roche mère géologique peut donc donner naissance à plusieurs roches mères pédologiques.

Exemple : un même granite donnera par altération :

- En conditions climatiques sèches et tempérées, un dépôt meuble sableux (arène granitique) où les processus physiques de désagrégation sont importants ;
- En conditions équatoriales, une argile latéritique où l'altération chimique est intense

Le sol étant un milieu en perpétuelle évolution, en perpétuelle transformation, le sol a un passé et il a un futur, passé que nous devons essayer de reconstituer, de comprendre, futur que nous devons essayer de prévoir et, d'assumer (Ruellan & Barral, 1983).

Rôle essentiel de ces ressources pour la vie et l'agriculture

Le sol et l'eau sont au cœur du fonctionnement des écosystèmes agricoles. Le sol est le principal réservoir de nutriments et d'eau nécessaires à la croissance des plantes, et il joue également un rôle de filtration et de purification pour les ressources en eau. La qualité du sol détermine en grande partie la productivité agricole, et une gestion durable des sols est indispensable pour maintenir leur fertilité sur le long terme (Lal & Stewart, 2012). Un sol de bonne qualité permet de conserver l'humidité, d'absorber les nutriments nécessaires aux plantes et de soutenir la biodiversité, qui est cruciale pour le bon fonctionnement des systèmes agricoles.

Les sols et les eaux sont essentiels à la vie sur terre, mais les pressions humaines sur les ressources en sol et en eau atteignent des limites critiques. En outre, la perte de sols productifs et des eaux de qualités va amplifier la volatilité des prix alimentaires et potentiellement reléguer des millions de personnes dans la pauvreté. Cette perte est évitable. La gestion prudente des

sols et des eaux peut augmenter l'approvisionnement en nourriture, fournir un levier précieux pour la régulation du climat et une voie pour sauvegarder des fonctions écosystémiques (Leenhardt, Voltz , & Barretea, 2020).

La gestion durable des ressources en eau et sol va générer d'importants avantages pour toutes les communautés. Pour certaines, ce sera une clé de la prospérité économique et dans d'autres, ce sera même important pour la sécurité nationale à court et moyen terme (Lal, 2004).

L'eau, de son côté, est indispensable pour le transport des éléments nutritifs dans le sol et pour le processus de photosynthèse, essentiel à la croissance des plantes. Une gestion efficace de l'eau permet d'assurer une production agricole stable tout en réduisant les risques de sécheresse ou de salinisation des sols. En outre, la quantité et la qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation affectent directement la productivité des cultures et la qualité des produits agricoles (FAO, 2017).

La présence de l'eau dans le sol joue un rôle très important, on s'intéresse à l'eau libre qui peut circuler entre les grains, cette eau saturant un massif de terrain construit une nappe souterraine, le plus souvent à surface libre ou parfois localisée entre deux formations imperméables c'est la nappe captive.

L'eau est un élément important du sol :

- L'eau présente dans le sol empêche celui-ci ne se désintègre pas en poussière. Une terre humide s'agrège elle aussi mieux.
- Aussi est important pour l'équilibre hydraulique. Il assume diverses fonctions dans la circulation de l'eau et constituer des réservoirs d'eau.
- L'eau aussi quand il rencontre une couche imperméable (Roche ou argile), il s'accumule il se forme des lacs superficiels ou des nappes souterraines
- L'eau aussi joue aussi un rôle dans, la dissolution, dépôt, la transformation, la dégradation et le transport de diverses substances.
- De nombreuses réactions chimiques ont lieu à l'interface entre la solution et la phase solide ou les organismes du sol.

Importance du sol et de l'eau en agriculture

L'importance du sol et de l'eau en agriculture ne se limite pas à la simple production alimentaire. Ces deux ressources jouent un rôle fondamental dans le maintien des fonctions

écologiques des sols et des écosystèmes agricoles. En régulant les flux d'eau, en stockant les nutriments et en soutenant la biodiversité, le sol et l'eau assurent la stabilité des écosystèmes agricoles. Cependant, la gestion des sols et de l'eau représente un défi majeur en raison de la dégradation progressive des sols, de la pollution de l'eau et de l'impact du changement climatique. Les pratiques agricoles non durables, telles que la surexploitation des sols ou l'irrigation inefficace, peuvent entraîner des phénomènes de désertification, de salinisation et de pollution des nappes phréatiques, compromettant ainsi la pérennité des systèmes agricoles (IPCC, 2023).

Objectifs du document

Ce document a pour objectif de fournir une compréhension approfondie du sol et de l'eau dans le cadre agricole. Nous chercherons à mettre en lumière leur rôle fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes, ainsi que les enjeux liés à leur gestion. À travers l'examen des interactions entre ces deux ressources, nous explorerons comment une gestion durable peut garantir une production alimentaire stable et de qualité, tout en préservant les écosystèmes naturels. Ce travail mettra également en évidence les défis actuels, tels que la gestion de l'eau dans les zones arides, la dégradation des sols et les impacts du changement climatique sur les cycles de l'eau.



A. Le sol

Le sol est une ressource naturelle fondamentale qui soutient la vie végétale et joue un rôle clé dans les écosystèmes terrestres. Il constitue la couche superficielle de la croûte terrestre, formée par l'altération des roches, la décomposition de la matière organique et l'activité biologique. Le sol est un milieu complexe composé de particules minérales, de matière organique, d'air et d'eau, et il assure des fonctions essentielles telles que la fourniture de nutriments et d'humidité aux plantes, la régulation des cycles biogéochimiques, ainsi que la filtration et le stockage de l'eau. En agriculture, le sol est crucial pour la production alimentaire, et sa gestion durable est indispensable pour maintenir la fertilité et la productivité des terres. Cependant, face aux pressions anthropiques comme l'érosion, la pollution et la dégradation, il devient essentiel de mieux comprendre les processus qui régissent le sol et d'adopter des pratiques agricoles qui préservent cette ressource vitale.

A.1. Processus de pédogenèse

Le processus de pédogenèse désigne la formation et l'évolution des sols à partir de la roche mère sous l'influence de facteurs climatiques, biologiques et géologiques. Ce processus complexe et dynamique aboutit à la formation de différents horizons du sol, chacun ayant des caractéristiques distinctes. Voici les principaux processus de pédogenèse accompagnés de leurs références :

A.1.1. Altération de la roche mère

La pédogenèse débute par l'altération de la roche mère, qui est décomposée par des processus physiques, chimiques et biologiques. L'altération physique comprend la désintégration des roches sous l'effet de l'humidité, des changements de température et de l'érosion mécanique par les racines des plantes. L'altération chimique transforme les minéraux de la roche en substances solubles et non solubles, ce qui permet la formation de nouveaux minéraux secondaires. L'altération biologique implique la dégradation de la matière organique par des micro-organismes et des racines de plantes, contribuant à l'enrichissement du sol en nutriments (Brady & Weil, 2017).

A.1.2. Accumulation de matière organique

L'accumulation de matière organique provient principalement de la décomposition de la matière végétale et animale (feuilles, racines, débris d'animaux). Cette matière organique, après dégradation, forme l'humus, qui enrichit le sol en nutriments, améliore sa structure et sa

capacité à retenir l'eau. L'humification de la matière organique est un processus clé dans la fertilité du sol et sa capacité à soutenir la vie végétale (Archambeaud & Thomas, 2022).

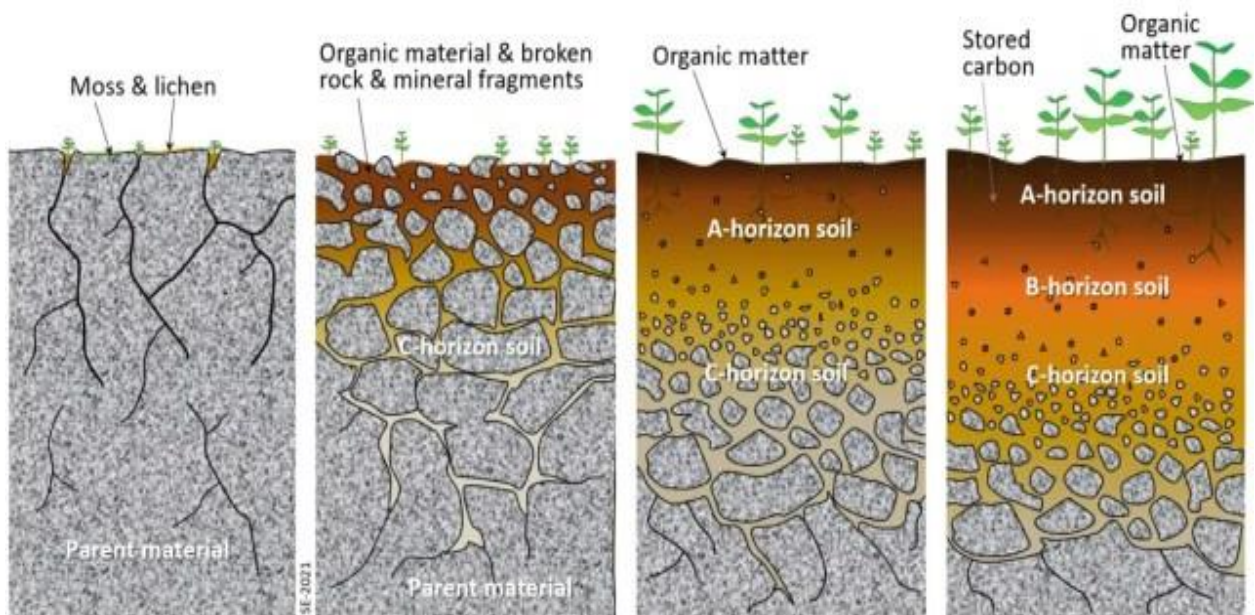


Figure 1. Formation du sol par altération et activité biologique de la roche mère.

A.1.3. Mécanismes de lessivage et de translocation

Le lessivage désigne l'élimination des éléments solubles (sels, minéraux) par l'eau qui percole à travers le sol. Ce processus entraîne la descente de ces éléments vers des couches plus profondes, parfois formant des accumulations d'argile ou de minéraux dans des horizons inférieurs (horizon illuvial). La translocation se réfère à la mobilité des particules et des nutriments dans le sol, influencée par l'eau, les racines des plantes et les animaux du sol (Jenny, 1980) (Fig. 2)

A.1.4. Influence du climat et de la biologie

Le climat, en particulier les températures et les précipitations, joue un rôle majeur dans le rythme de l'altération des roches et de la dégradation de la matière organique. Par exemple, les zones tropicales chaudes et humides favorisent une pédogenèse rapide, tandis que les zones froides ralentissent ces processus. En parallèle, la biologie, incluant les racines des plantes, les micro-organismes et la faune du sol, influence directement la composition du sol par la dégradation de la matière organique et la modification de la structure du sol (Ogwu, Izah, Dessureault-Rompré, & Gasparatos, 2024) (Fig. 2).

LA FORMATION D'UN SOL

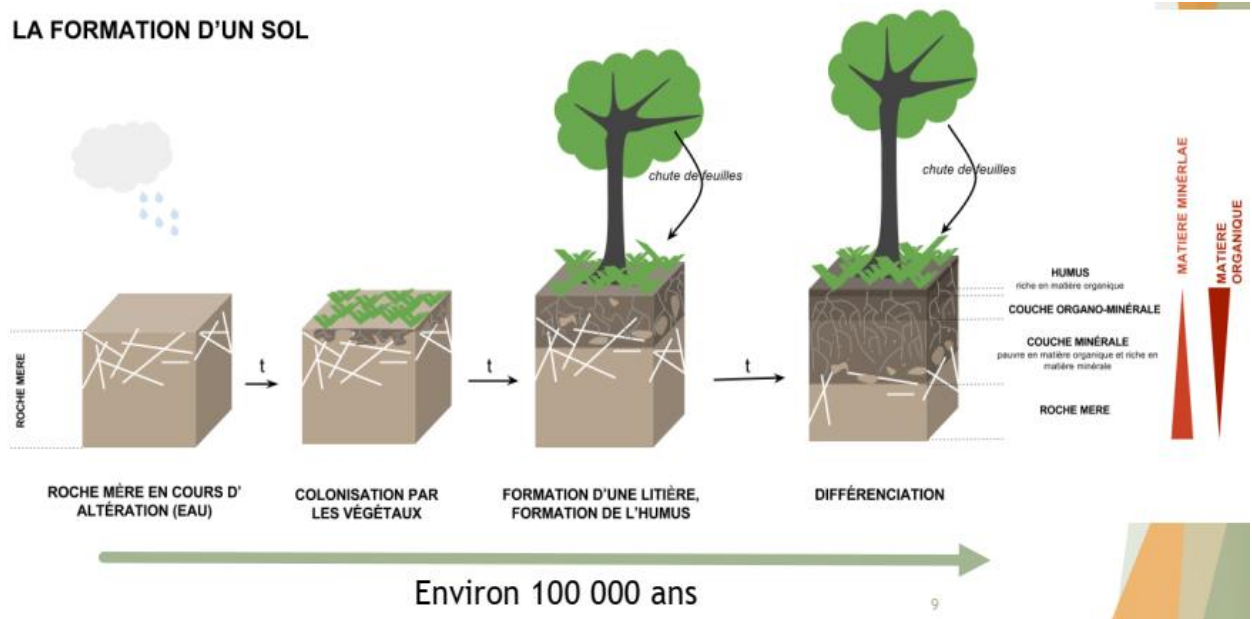


Figure 2. Formation et évolution organique et minérale du sol

A.1.5. Temps

Le temps est un facteur essentiel dans la formation du sol. La pédogenèse prend généralement des milliers à des millions d'années pour aboutir à un sol mature. Les sols jeunes, encore en développement, ont une structure moins complexe et sont moins fertiles que les sols plus anciens, qui ont eu le temps d'évoluer et d'accumuler une riche couche de matière organique et de minéraux (Jenny, 1980).

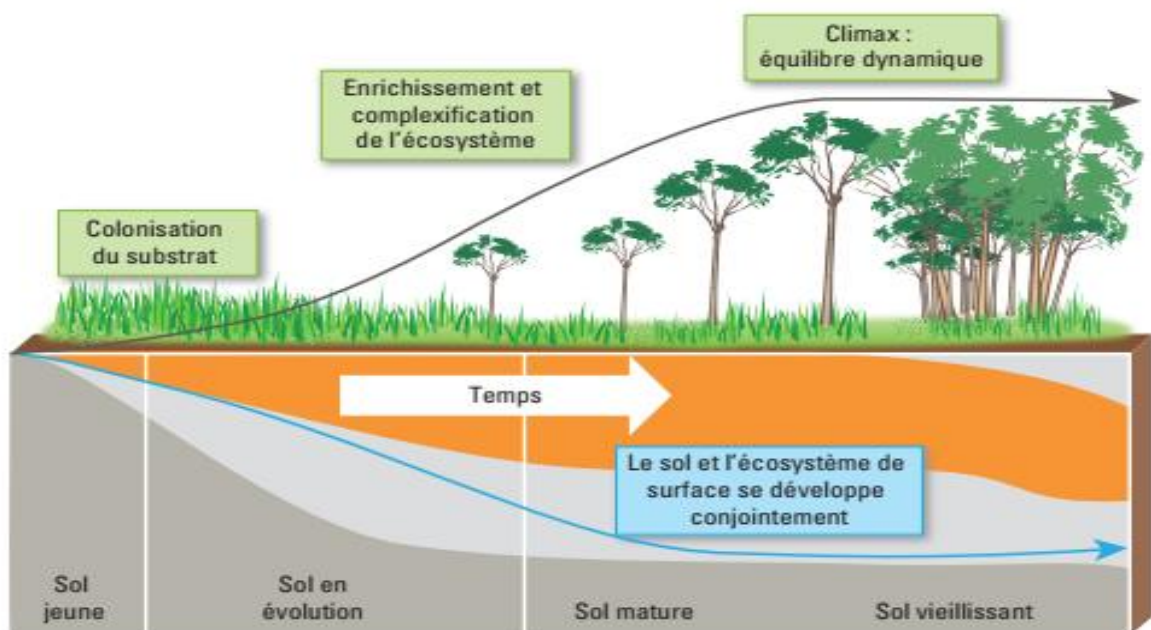


Figure 3. Schéma de l'évolution d'un sol à partir de la roche-mère. (Archambeaud & Thomas, 2022).

A.2. Éléments constitutifs du sol.

Comprendre la composition du sol est très utile. Cela permet à chacun d'entre nous d'être mieux sensibilisé à son propre impact sur le sol, et par conséquent sur la vie végétale.

En première analyse, le sol peut être représenté schématiquement comme constitué d'un volume de solides et d'un volume de vides. Le volume des solides est constitué des différents minéraux et des particules de matière organique et les vides occupent les espaces libres entre les particules (minéraux et matière organique). À son tour, le volume des vides est divisé en une phase liquide et une phase gazeuse.

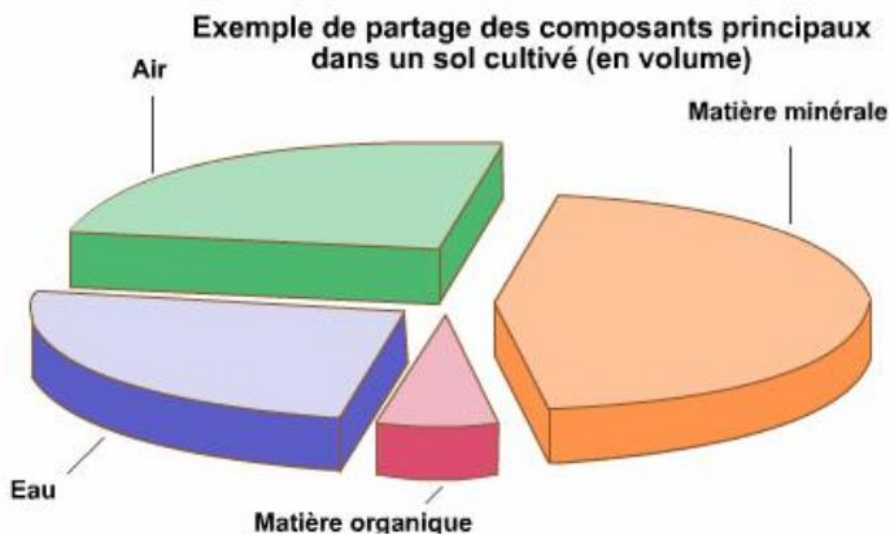


Figure 4. Représentation schématique d'un volume de sol.

A.2.1. Constituants minéraux

Les particules minérales constituent la majorité du volume du sol. Elles sont issues de la dégradation des roches et se divisent en trois catégories en fonction de leur taille : sable, limon et argile.

A.2.1.1 Sables

Les particules de sable sont les plus grosses, ayant un diamètre supérieur à 0,05 mm et allant jusqu'à 2 mm. Sont caractérisés par une faible capacité de rétention d'eau et une bonne aération. Cela permet un drainage rapide de l'eau, mais les sols sableux manquent souvent de nutriments et d'humidité nécessaires à une croissance végétale optimale. En revanche, ces sols sont faciles à travailler. Leur rôle dans le sol est bien que peu nutritifs, les sables contribuent à la structure du sol en permettant une bonne circulation de l'air et de l'eau (Weil & Brady, 2017).

A.2.1.2 Limons

Les particules de limon ont un diamètre compris entre 0,002 mm et 0,05 mm. Elles sont plus petites que les particules de sable, mais plus grosses que celles de l'argile. Sont caractérisé par une texture douce et peuvent retenir de l'eau tout en permettant une certaine aération. Les sols limoneux sont souvent considérés comme des sols « équilibrés » car ils offrent un bon compromis entre rétention d'humidité et drainage. Leur rôle dans le sol est important pour les sols agricoles, car ils favorisent une croissance végétale saine grâce à leur capacité à retenir l'eau et les nutriments (Brady & Weil, 2017).

A.2.1.3 Argiles

Les particules d'argile sont les plus petites, avec un diamètre inférieur à 0,002 mm. Elles sont très fines et peuvent être d'origine minérale ou dérivées de la dégradation d'autres minéraux. Sont caractérisés par une grande capacité de rétention d'eau et de nutriments. Les sols argileux sont riches en minéraux et peuvent être très fertiles. Toutefois, une trop grande quantité d'argile peut conduire à un mauvais drainage et à un sol trop compacté, rendant difficile l'aération des racines. De ce fait elles jouent un rôle dans le sol comme excellent support pour les nutriments grâce à sa capacité d'échange cationique élevée (CEC), ce qui permet aux plantes de bénéficier d'une réserve importante de nutriments (Lal & Stewart, 2012).

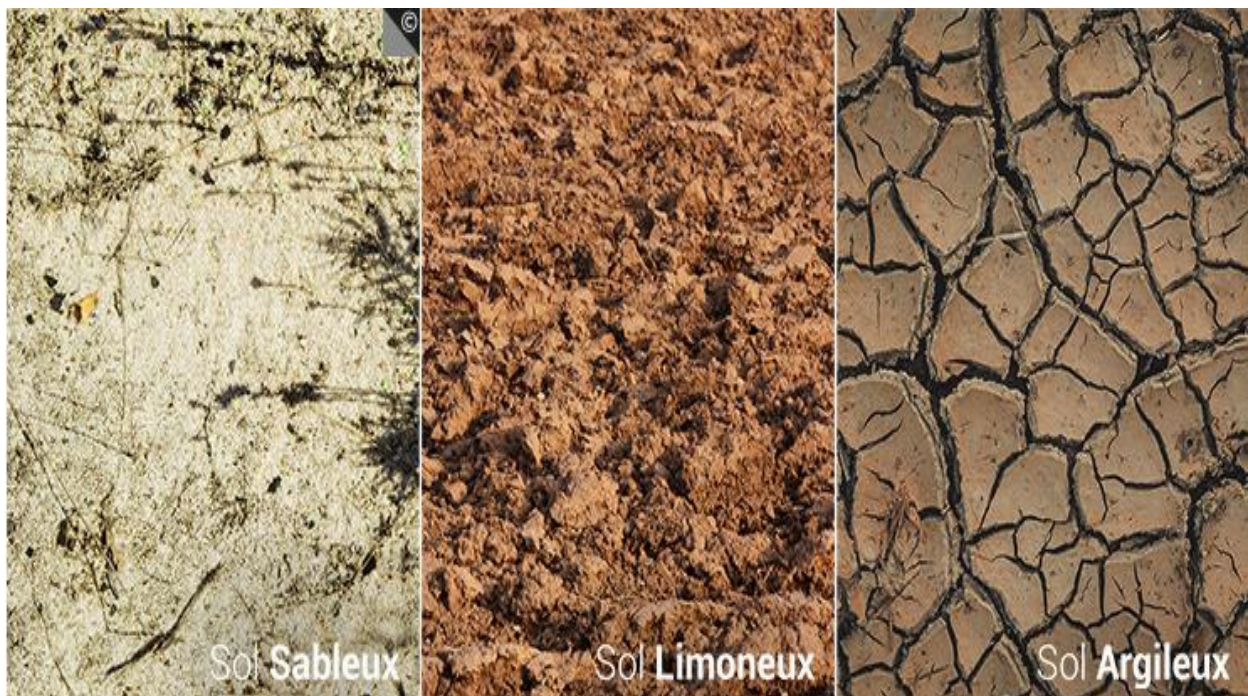


Figure 5. Présentation de trois type du sol Sableux; Limoneux et Argileux.

A.2.2. Constituants organiques

Le sol est un milieu complexe qui joue un rôle central dans la croissance des plantes, la régulation des cycles biogéochimiques et la biodiversité. Parmi les nombreux composants du sol, les constituants organiques occupent une place essentielle. Ces derniers sont principalement constitués de matière organique d'origine végétale et animale, dégradée par l'action de micro-organismes et d'autres organismes du sol. Les constituants organiques du sol influencent directement sa fertilité, sa structure, sa capacité de rétention d'eau et son activité biologique. En décomposant la matière organique, les micro-organismes et les macro-organismes du sol libèrent des nutriments essentiels pour les plantes, créant ainsi un environnement favorable à leur développement. L'étude de ces constituants et de leurs interactions est donc essentielle pour comprendre les mécanismes de fertilité et de durabilité des sols.

La fraction solide de terre fine comprend généralement 1 à 5% de matière organique et 95 à 99% de matière minérale.

A.2.2.1 La Matière Organique (MO) du Sol

La matière organique du sol est constituée de l'ensemble des matières dérivées de la dégradation de la biomasse, qu'elle soit végétale ou animale. Elle comprend (Roose, 2018) (Fig. 6) :

Les Résidus Végétaux : Ces résidus incluent les feuilles, les racines, les tiges, les fleurs, et les fruits des plantes mortes ou en décomposition. En fonction de leur taux de dégradation, ces matières végétales peuvent être classées en différentes catégories de "litter" (litière) et de matière organique plus ou moins décomposée.

Les Résidus Animaux : Les débris provenant des cadavres des animaux morts, des excréments, des carapaces, des insectes, et des autres organismes qui peuplent le sol.

Les Micro-organismes : Les bactéries, champignons, actinomycètes et algues vivant dans le sol. Ces organismes sont responsables de la dégradation de la matière organique et jouent un rôle fondamental dans le recyclage des nutriments (Paul, 2014).

A.2.2.2 L'Humus¹

L'humus est un complexe de substances organiques très décomposées, formé principalement par la dégradation de la matière organique par les micro-organismes et d'autres organismes du sol. Il est riche en substances complexes comme les acides humiques et fulviques, qui se forment lors de la dégradation lente de la matière organique. L'humus a plusieurs fonctions (Bot & Benites, 2005) :

Fertilité du sol : L'humus agit comme un réservoir de nutriments pour les plantes. Il contient des cations échangeables (calcium, magnésium, potassium, etc.) et des anions comme les nitrates et les phosphates, qui sont libérés au fur et à mesure que les plantes en ont besoin (Stevenson, , 1994).

Structure du sol : L'humus favorise la formation d'agrégats dans le sol, ce qui améliore la structure, la porosité, et la rétention d'eau. Un sol riche en humus est souvent plus meuble et plus aéré.

Régulation de l'acidité du sol : L'humus aide à tamponner les variations de pH du sol, créant un environnement plus stable pour les racines des plantes.

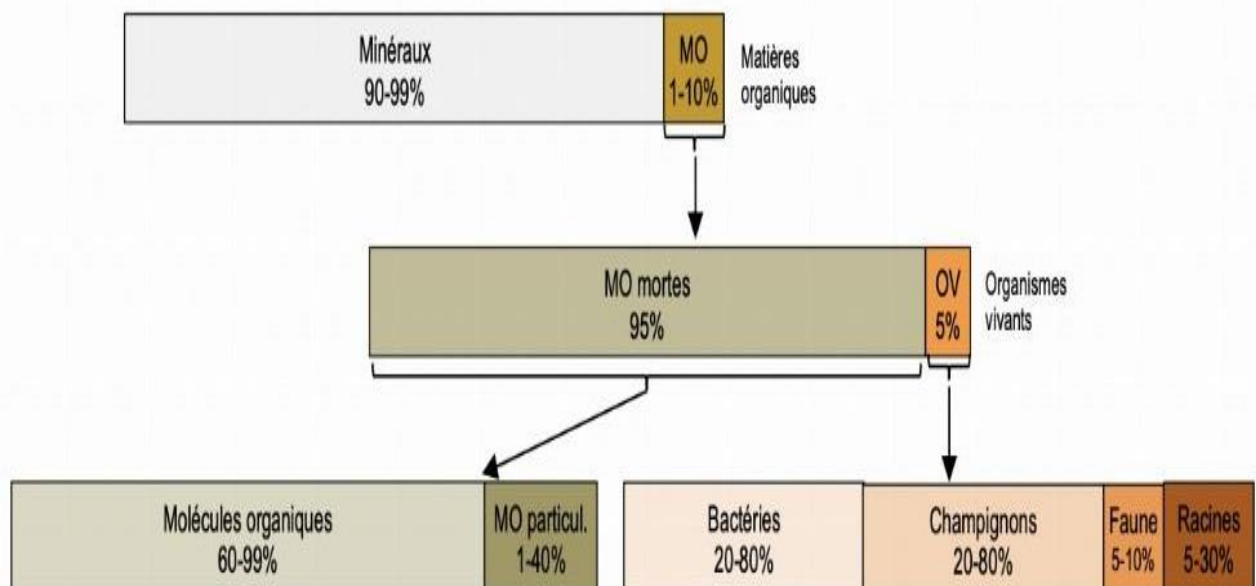


Figure 6. La matière organique du sol ; proportion indicative en masse (Calvet, Chenu, & Houot, 2011).

¹ Pour plus d'explication vous pouvez consulter un vidéo lien : <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=qlLdiKRWks4>

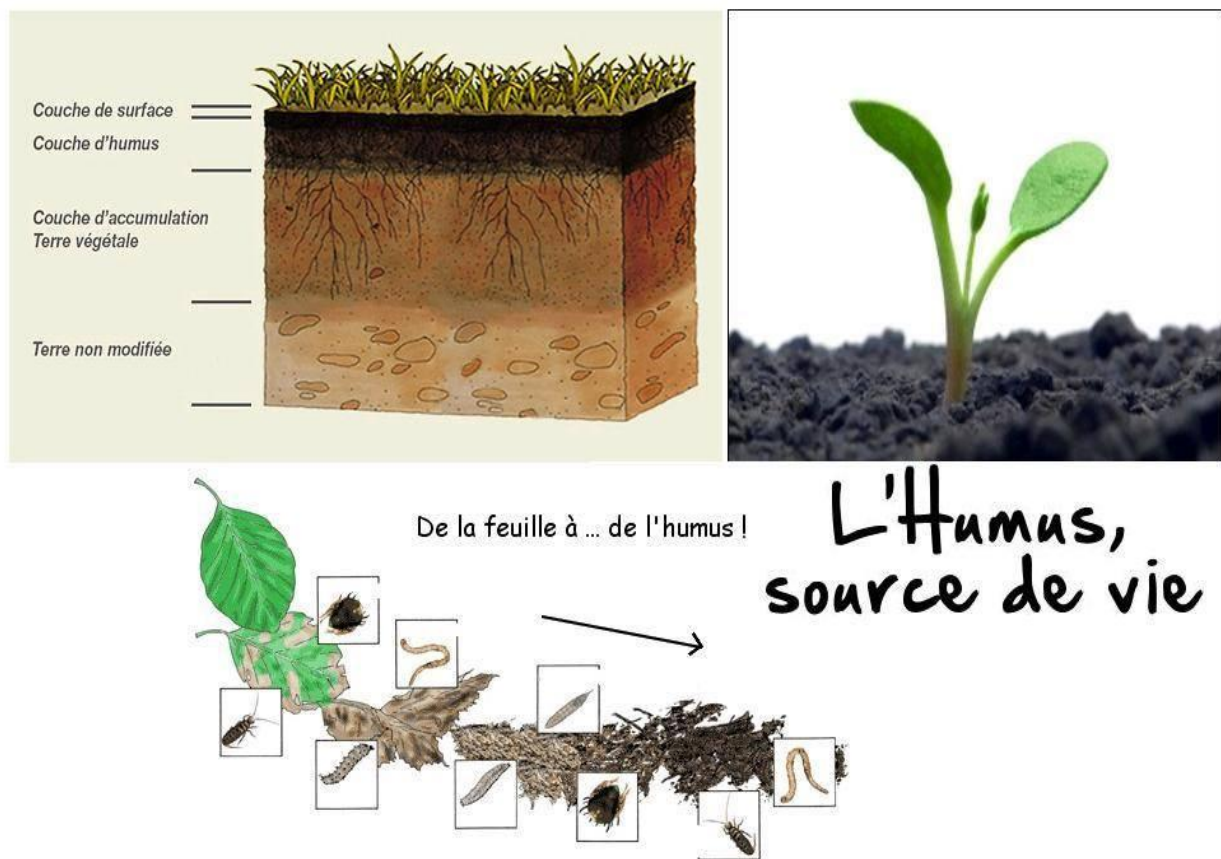


Figure 7. Evolution de la matière organique et formation de l'Humus

A.2.2.3 Les Substances Organiques Solubles

Les substances solubles dans l'eau du sol sont souvent les produits intermédiaires ou les premiers produits de la dégradation de la matière organique. Ces substances comprennent (Roose, Sabir, & Laouina, 2010) :

Acides humiques et acides fulviques : Ce sont les principales composantes solubles de l'humus. Les acides humiques sont responsables de la couleur foncée du sol et ont un rôle clé dans la rétention d'éléments nutritifs, tandis que les acides fulviques sont plus solubles dans l'eau et sont plus facilement accessibles aux plantes.

Protéines, acides aminés et sucres : Ce sont des produits de dégradation de la matière organique qui peuvent être directement absorbés par les plantes ou les micro-organismes du sol.

Composés phénoliques et polyphénols : Ces molécules jouent également un rôle dans la dégradation des matières organiques et peuvent influencer la santé du sol en régulant la croissance des micro-organismes.

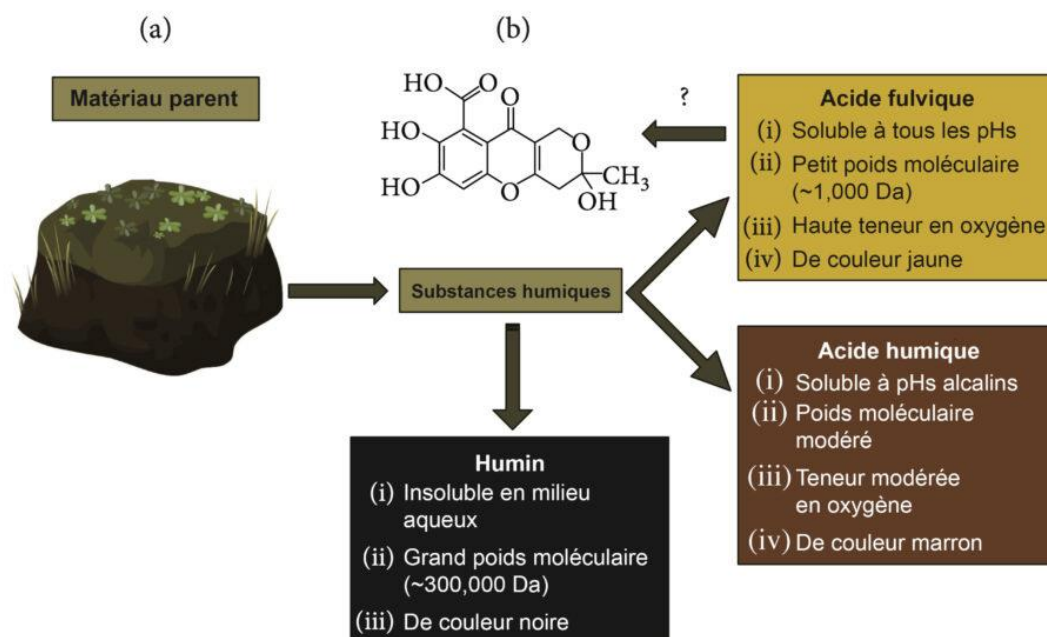


Figure 8. Schéma d'évolution de la matière organique et ses produits (Acide Fulvique et Acide Humique)

A.2.2.4 Les Micro-organismes du Sol

Les micro-organismes du sol, notamment les bactéries, champignons, actinomycètes, et algues, sont les principaux acteurs du cycle de la matière organique. Ils décomposent les résidus organiques en éléments plus simples, tels que le dioxyde de carbone, l'eau, les minéraux et les nutriments, qui sont ensuite disponibles pour les plantes. Leur activité microbienne est essentielle pour la dégradation des matières organiques complexes (Bekele & Getaneh, 2022).

Bactéries : Elles décomposent principalement la matière organique facilement dégradable et participent à des processus comme la fixation de l'azote (dans le cas des bactéries symbiotiques des légumineuses) et la transformation de la matière organique en humus (Bardgett, 2010). Les bactéries du sol peuvent être classées en deux grands groupes : Espèces autochtones, caractéristiques d'un sol et leur nombre demeure pratiquement constante, à l'exception de certaines appelées "bactéries zymogènes" selon Winogradsky, qui ne prolifèrent qu'en présence d'un substrat spécifique. Deuxième catégorie des espèces étrangères, elles ne participent pas activement aux fonctions biochimiques de la communauté. Elles atteignent le sol par les précipitations, des résidus contaminés ou des eaux usées.

Champignons : Les champignons sont plus efficaces que les bactéries pour dégrader les matières organiques lignifiées (bois, tiges, etc.), et jouent un rôle majeur dans la formation de l'humus. Les sols arables sont dominés par des champignons endomycorhiziens symbiotiques

(ci-après dénommés mycorhizes arbusculaires) qui colonisent les racines de près de 90% des plantes herbacées : graminées, céréales, légumes et plantes-racines. La symbiose arbusculaire est présente dans certaines plantes ligneuses et arbustes fruitiers comme le pommier, le cerisier, le noyer, le peuplier, le saule, le robinier faux-acacia, le mûrier, le frêne, le cornouiller (Liu, Hamel, Hamilton, & Smith, 2000)

A.2.2.5 Les Macro-organismes du Sol

Les macro-organismes, tels que les vers de terre (lombrics), les insectes, et les racines des plantes, participent également à la dégradation de la matière organique et influencent la structure du sol.

Les vers de terre : Le terme “vers de terre” regroupe plus de 2500 espèces de la classe des *Annélides oligochètes* (organismes possédant des soies généralement peu nombreuses et implantées directement dans les téguments) dans le monde. Ils ingèrent la matière organique, la digèrent et l'excrètent sous forme d'humus riche. Leur activité augmente l'aération du sol et favorise la formation de granulats, ce qui améliore la porosité et la capacité de rétention d'eau. Une tonne de lombriciens par hectare est capable de forer et d'entretenir des galeries, qui correspondent à 4% voire 6% du volume de sol. Elles sont organisées en réseaux et peuvent déboucher à la surface. Dans une prairie sur limons profonds, ces galeries qui forment de vraies canalisations représentent entre 400 m et 500 m linéaires par m³ de sol, et des agronomes suisses ont même estimé la porosité lombricienne à 600 m linéaire par m³ dans une parcelle en semis direct depuis plusieurs années (Cluzeau & Peres, 2004).

Tableau 1. Evaluation de l'impacte des vers de la terre sur les constitutions des sols arables (Cluzeau & Peres, 2004).

Composition des déjections de vers de terre en comparaison à la terre arable voisine			
Composition	Déjections de vers de terre	Sol voisin (0 à 15 cm)	Sol voisin (20 à 40 cm)
Azote total (%)	0,35	0,25	0,081
Carbone organique (%)	5,2	3,32	1,1
Rapport C/N	14,7	13,8	13,8
NO ₃ -N (mg/l)	22,0	4,7	1,7
P ₂ O ₅ (mg/l)	150,0	20,8	8,3
Ca échangeable (mg/l)	2793	1993	481
Mg échangeable (mg/l)	492	162	69
Ca total (%)	1,2	0,88	0,91
Mg total (%)	0,54	0,51	0,55
K ₂ O (mg/l)	358	32	27
pH	7,0	6,4	6,0
Humidité	31,4	27,4	21,1

Les insectes et autres invertébrés : Ils contribuent à la fragmentation de la matière organique, ce qui facilite l'accès des micro-organismes aux résidus végétaux et animaux.

D'après les différents auteurs (Quastel, 1955; Bachelier, 1963; Bachelier, 1978), les Champignons et les Algues pourraient représenter dans ce sol hypothétique environ 1 kg de matière vivante au mètre carré, les Bactéries 1 kg, les Actinomycètes 300 g, les vers de terre 100 à 200 g, les autres métazoaires 50 à 100 g et les Protozoaires 10 à 20 g, soit un total approximatif de 2,5 kg de matière vivante au mètre carré, dont 10 % environ pour la faune. Plusieurs embranchements du règne animal ont d'importants rameaux adaptés à la vie dans les sols. Arbitrairement, on parle souvent, selon la taille des animaux, de microfaune, mésofaune, macrofaune et mégafaune. Pour si artificielle que soit cette classification, elle a l'avantage d'être pratique, aussi la suivrons-nous ici pour rappeler 'brièvement quels sont les animaux qui vivent dans les sols et font l'objet de ce cycle de conférences.

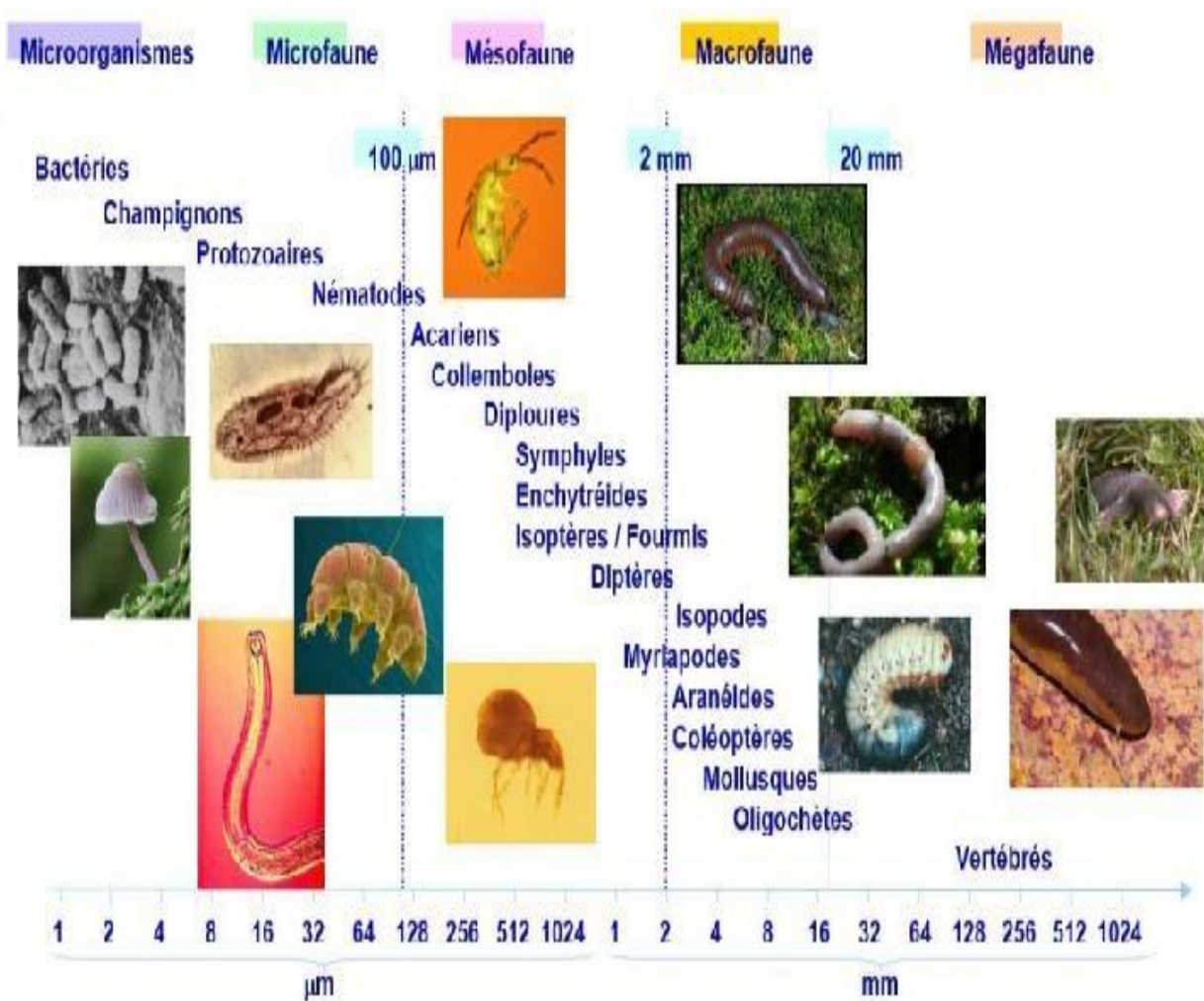


Figure 9. Présentation de la classification de la faune du sol

A.2.2.6 Rôle global des constituants organiques

Les constituants organiques du sol interagissent de manière complexe pour remplir plusieurs fonctions vitales (Stevenson, 1982; Tisdall & Oades, 1982) :

Recyclage des nutriments : La décomposition de la matière organique permet la libération d'éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore et le potassium, qui sont ensuite disponibles pour les plantes. La minéralisation de la matière organique par les micro-organismes permet de maintenir la fertilité du sol.

Stabilisation de la structure du sol : La matière organique améliore la structure du sol, ce qui favorise la circulation de l'air et de l'eau. Les sols riches en matière organique ont une meilleure capacité de rétention d'eau, ce qui est essentiel en période de sécheresse.

A.2.3. Les propriétés physiques du sol

Les propriétés physiques du sol jouent un rôle crucial dans son fonctionnement écologique et sa capacité à soutenir la vie végétale. Ces propriétés déterminent la manière dont l'eau et l'air circulent dans le sol, ainsi que la manière dont les racines des plantes interagissent avec le sol. Or, lorsque la structure du sol est dégradée, ces échanges peuvent être sérieusement compromis, avec un impact possible sur le rendement. De plus, des pertes de sol par érosion peuvent occasionner de gros dégâts. La fertilité comprend donc une composante physique qui peut se résumer en deux mots : un sol organisé. Cette approche est centrale pour les pratiquants de l'agriculture de conservation (Bougeois, Coquillard, Cournar, & Fassino, 2024).

Voici une explication détaillée des principales propriétés physiques du sol

A.2.3.1 La Texture du sol

La texture du sol fait référence à la proportion relative des différents groupes de taille de minéraux dans le sol, c'est-à-dire le sable, le limon et l'argile. La texture influence la rétention et la disponibilité de l'eau du sol, la structure du sol, l'aération, la biodiversité et régule l'apport de nutriments. Une meilleure connaissance de la classe texturale du sol permet une évaluation approximative de la capacité totale de rétention d'eau du sol, l'un des principaux moteurs de la production agricole. L'évaluation visuelle est possible grâce à la méthode de l'anneau. La texture indique l'abondance relative, dans le sol, de particules de dimensions variées. Ces particules sont triées selon leur taille et classées en 3 classes : sables, limons ou argile selon les critères suivants (Mathieu & Lozet, 2011).

Tableau 2. Répartition des particules du sol par taille avec un échelle granulométrique.

éléments du sol	Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Graviers	Cailloux
la taille	< 2 μm	2 μm à 20 μm	20 μm à 50 μm	50 μm à 200 μm	200 μm à 2 mm	2 mm à 20 mm	> 20 mm

Le Sable : Les particules de sable sont grosses et grossièrement arrondies. Elles ont une faible capacité à retenir l'eau, mais elles offrent une bonne aération et un bon drainage. Les sols sableux sont bien drainés mais nécessitent plus d'apports en eau et en nutriments. La fertilisation de ces sols est considérée comme essentielle. La fertilisation minérale est principalement utilisée. Donc l'application d'engrais organiques peut fournir des éléments nutritifs dans des formes lentement disponibles et améliorer les propriétés physico-chimiques des sols (FAO, 2024).

Limon : Le limon est une fraction de particules du sol qui se situe entre l'argile et le sable en termes de taille. Sa taille est généralement comprise entre 0,002 mm et 0,05 mm. Le limon est un composant clé des sols et possède des caractéristiques particulières qui influencent son rôle dans le sol, notamment la capacité de rétention d'eau, la fertilité et la perméabilité. Voici un aperçu détaillé du limon et de ses propriétés physiques et chimiques. Le limon est généralement bien structuré et forme des agrégats qui peuvent être légèrement friables. Les sols limoneux possèdent souvent une structure qui permet un bon équilibre entre aération et rétention d'eau (Hillel, 2003).

Argile : L'argile est une fraction fine du sol constituée de particules dont le diamètre est inférieur à 0,002 mm. Les sols argileux ont des caractéristiques spécifiques qui influencent fortement leur comportement, leur fertilité et leur utilisation en agriculture. Bien qu'ils présentent certains défis pour la gestion des cultures, ils offrent également des avantages significatifs lorsqu'ils sont bien gérés. En raison de leur petite taille, elles ont une grande surface spécifique, ce qui leur permet de retenir une quantité importante d'eau et de nutriments. Mais aussi, ils peuvent devenir collants et difficiles à travailler lorsqu'ils sont trop humides, et peuvent devenir compacts, limitant le développement des racines (Hillel, 2003). D'une autre côté, l'argile a une capacité d'échange cationique élevée. Cela signifie qu'elle peut retenir et échanger un grand nombre de nutriments (comme le calcium, le magnésium, le potassium, et

l'azote) nécessaires à la croissance des plantes. Les sols argileux sont donc généralement plus fertiles que les sols sableux, car ils conservent mieux les nutriments et les éléments essentiels pour les cultures (Zama , Kirkman, Mkhize, Tedder, & Magadlela, 2022).



Figure 10. Présentation de différentes textures du sol (Sable, Limon et Argile)

Détermination de la texture : La texture du sol fait référence à la proportion relative des différentes tailles de particules minérales qui composent un sol, en particulier les proportions de sable, de limon et d'argile. On peut déterminer la texture de nos sols par différentes méthodes : La Méthode simple du "test de la main", cette méthode permet de déterminer rapidement, mais de manière approximative, la texture du sol en utilisant uniquement les mains. Prenez une petite quantité de sol (environ une poignée) et humidifiez-la avec de l'eau jusqu'à ce que vous obteniez une pâte malléable, mais pas trop liquide. En essayant de former une boule (Si le sol est principalement sableux, il sera rugueux et granuleux au toucher et ne pourra pas être façonné en une boule stable. Si le sol est principalement limoneux, il aura une texture lisse et douce, mais il peut être façonné en une boule qui se déforme facilement. Et Si le sol est principalement argileux, il sera lisse et collant, et vous pourrez former une boule compacte et peut-être même une fine bande (ruban) qui peut être étirée entre les doigts) (Brady & Weil, The Nature and Properties of Soils, 2008).

La deuxième méthode est celle de la méthode de la pipette (méthode de sédimentation en laboratoire améliorée), Il s'agit d'une méthode plus avancée pour déterminer la texture du sol

en laboratoire, fondée sur le principe de sédimentation des particules en fonction de leur taille. Le test de pipette permet de mesurer de manière plus précise les fractions d'argile, de limon et de sable, cela facilite la détermination exacte de la texture du sol (Klute, 1986) (Fig. 11).

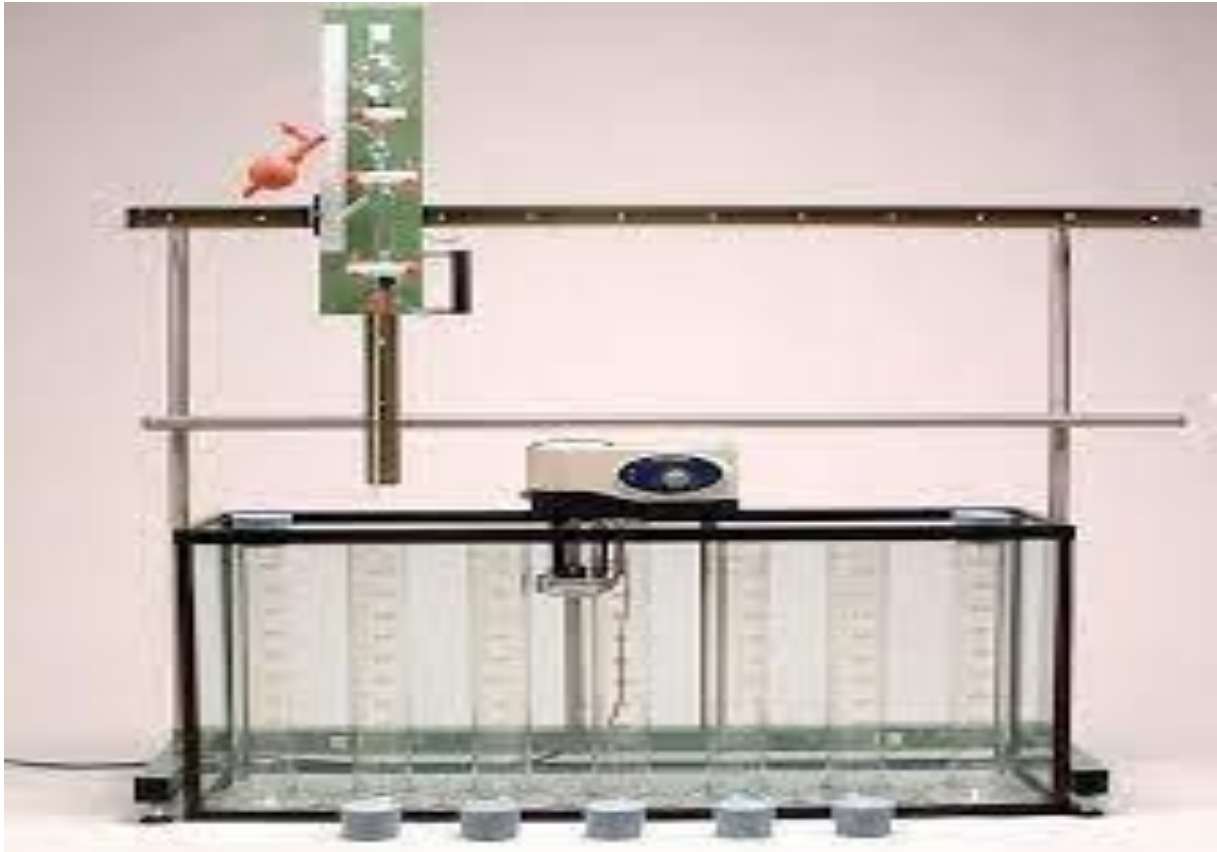


Figure 11. Méthode de détermination de la granulométrie par pipette de Robinson

La dernière méthode est celle de triangle textural, une fois que vous avez déterminé les pourcentages approximatifs de sable, limon et argile, vous pouvez utiliser un triangle textural pour classer la texture de votre sol. Le triangle textural est un outil graphique qui permet de visualiser la combinaison des trois fractions (FAO, 2015).

Parmi les triangles les plus utilisés en agriculture le triangle de Douchfour est basé sur un principe similaire au triangle textural classique, mais avec une disposition des axes qui permet de mieux visualiser les proportions des différentes fractions de sol. Le triangle est un graphique à trois axes, où chaque côté du triangle représente un type de particule (argile, limon ou sable), et les proportions de chacun des types sont tracées à partir des points de chaque côté du triangle. Une fois les proportions de sable, limon et argile déterminées (souvent par sédimentation ou par un test de texture), ces valeurs sont reportées sur le triangle pour déterminer la classe texturale du sol (Fig. 12).

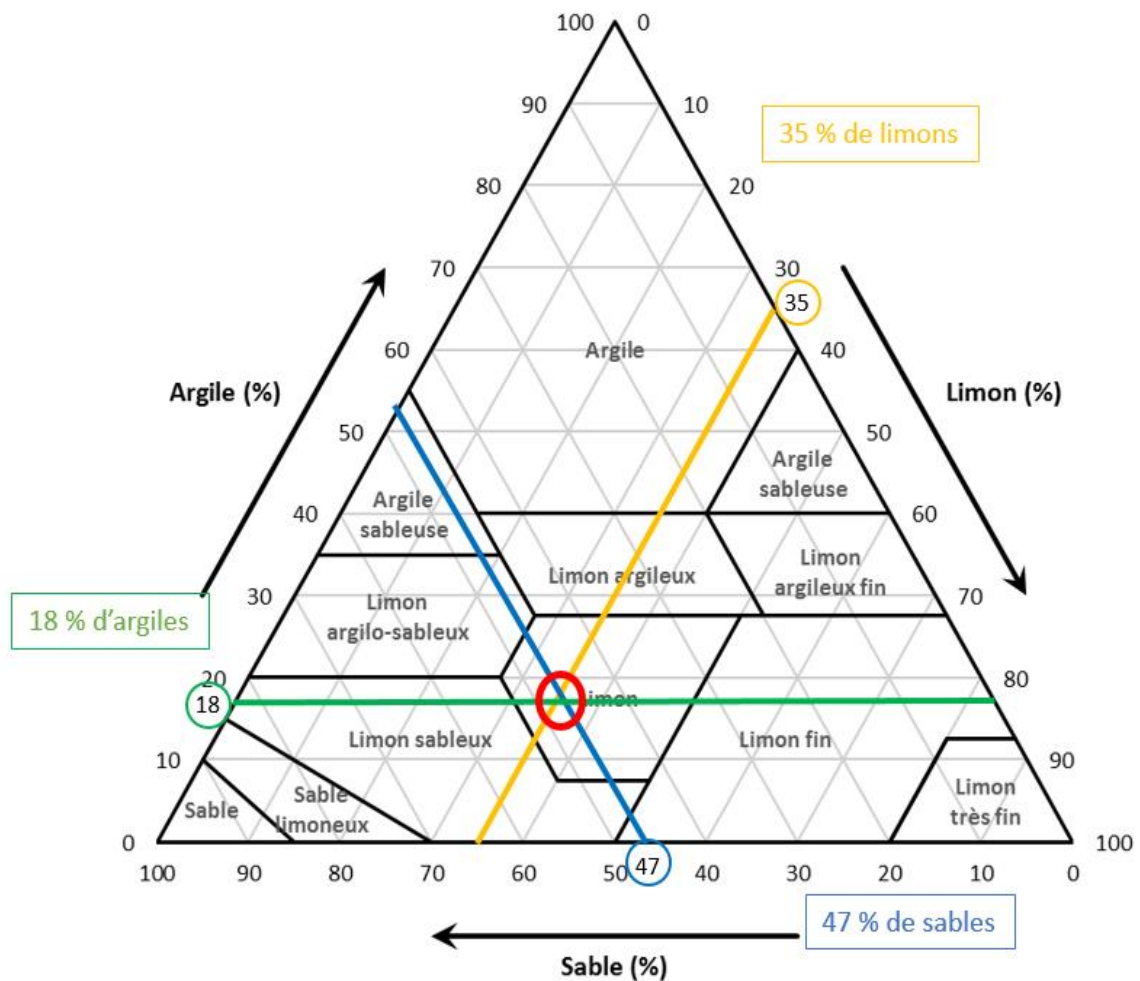


Figure 12. Identification de texture des sols par le Triangle textural (Duchaufour, 1997).

A.2.3.2 La Structure du sol

La structure du sol fait référence à l'organisation et à l'arrangement des particules solides de sol (sable, limon, argile) ainsi que des espaces poreux qui permettent l'air et l'eau de circuler à travers le sol. La structure du sol est un facteur clé pour déterminer la capacité de rétention d'eau, la perméabilité, l'aération et la fertilité du sol. Une structure de sol bien développée favorise la croissance des plantes en facilitant l'absorption de l'eau et des nutriments tout en permettant une bonne aération des racines (Denis, Odile, & Guy, 2013).

Les composants de la structure du sol : La structure du sol se compose principalement de trois éléments (Brady & Weil, 2008) :

- Les particules solides : Cela comprend le sable, le limon et l'argile, qui sont les principaux constituants du sol.

- Les pores : Ce sont les espaces vides entre les particules solides, et ils sont remplis d'air et d'eau. La taille, la forme et la distribution de ces pores déterminent la capacité du sol à retenir l'eau et à permettre l'aération.
- La matière organique : Elle inclut les résidus de plantes et d'animaux, et joue un rôle majeur dans la formation et la stabilité de la structure du sol.

Types de structure du sol : La structure du sol fait référence à la façon dont les particules du sol (sable, limon et argile) sont arrangées et liées entre elles. Voici les principaux types de structure du sol (Denis , Odile, & Guy, 2013; Hillel, 2003) :

- Structure en grumeaux (ou structure en agrégats) : Ce type de structure est caractérisé par des agrégats (ou grumeaux) qui se forment par des liaisons entre les particules de sol. Ces agrégats peuvent être de taille variable et sont souvent arrondis ou irréguliers. La matière organique et l'activité biologique (vers de terre, racines, etc.) contribuent à la formation de ces agrégats.
- Structure en prismes (ou structure prismatique) : Cette structure est caractérisée par des blocs ou des prismes longs et étroits. Elle est typique des sols argileux dans des conditions où la compaction est importante. La circulation de l'eau et de l'air peut être limitée si ces prismes sont trop denses.
- Les sols à structure lamellaire présentent des plaques fines et plates qui peuvent être disposées parallèlement les unes aux autres. Ce type de structure est souvent associé à des sols ayant un compactage élevé ou des horizons d'argile qui sont peu perméables.
- Les sols avec une structure en bloc sont caractérisés par des agrégats qui forment des formes plus régulières, souvent cubiques ou polyédriques. Cette structure est idéale pour les sols cultivés, car elle offre un bon équilibre entre la rétention d'eau et la perméabilité.
- Structure granulaire : La structure granulaire est celle qui est idéale pour les sols sableux ou limoneux. Elle est formée de petits agrégats arrondis, créant beaucoup de pores et permettant une excellente circulation de l'air et de l'eau. Elle est également favorable à la croissance des racines.

Les Facteurs influençant la structure du sol : Plusieurs facteurs influencent la structure du sol, y compris la texture du sol, le contenu en matière organique, l'humidité, la compaction, l'activité biologique et l'ajout d'amendements (Calvet, 2003).

- Texture du sol : La texture (proportions de sable, limon et argile) joue un rôle fondamental dans la formation de la structure. Par exemple, les sols argileux ont une tendance à former des structures plus compactes et moins perméables, tandis que les sols sableux sont généralement plus bien aérés avec une structure plus granulaire.
- Matière organique : La matière organique améliore la structure du sol en agissant comme un liant entre les particules de sol. Elle facilite la formation d'agrégats et permet d'améliorer la porosité et la rétention d'eau.
- Activité biologique : Les micro-organismes, les vers de terre et d'autres organismes vivants jouent un rôle clé dans la formation de la structure du sol. Ils décomposent la matière organique, ce qui aide à la formation d'agrégats et à l'amélioration de la porosité du sol.
- Compaction et pression : Une compaction excessive du sol, due à l'utilisation d'engins agricoles lourds ou à un piétinement excessif, peut détruire la structure du sol en réduisant l'espace poreux. Cela peut nuire à l'aération, à la circulation de l'eau et à la croissance des racines.

Importance de la structure du sol pour l'agriculture : La structure du sol a une influence majeure sur les propriétés agronomiques du sol, notamment (Brady & Weil, 2008; Calvet, Chenu, & Houot, 2011; FAO, 2015):

- L'aération : Une bonne structure permet une circulation efficace de l'air, ce qui est essentiel pour la respiration des racines.
- La rétention d'eau : Les sols avec une bonne structure retiennent mieux l'eau sans devenir trop détrempés, ce qui est crucial pour la croissance des plantes.
- La pénétration des racines : Une bonne structure permet aux racines de pénétrer facilement le sol, ce qui permet une meilleure absorption des nutriments.
- La perméabilité : Une structure appropriée permet une infiltration efficace de l'eau, réduisant le ruissellement et favorisant une gestion plus efficace de l'irrigation.




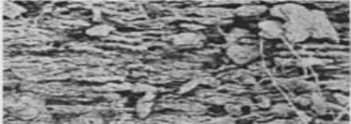






<p>Caractéristique des horizons de surface (A)</p>	<p>SPHÉRIQUE</p>  <p>Grumeleuse (poreuse)</p> <p>Grenue (très poreuse)</p>	
<p>Commun dans l'horizon Ae, et parfois ailleurs dans le profil de sol. Souvent hérité du matériau d'origine ou causé par la compaction</p>	<p>LAMELLAIRE</p> 	
<p>Commun dans l'horizon B, en artériel dans les régions humides. Peut aussi se trouver dans l'horizon A.</p>	<p>POLYÉDRIQUE</p>  <p>Angulaire</p> <p>Subangulaire</p>	 
<p>Généralement dans l'horizon B. Commun dans les sols des régions arides et semi-arides.</p>	<p>PRISMATIQUE</p>  <p>Colonnaire (arêtes arrondies)</p> <p>Prismatique (arêtes nettes)</p>	 

Figure 13. Les différents types de structure du sol avec explication (Brown, Biswas, Caron, Dyck, & Si, 2024).

A.2.3.3 Complexe colloïdal (Complexe argilohumique)

Colloïde vient du grec : Kolla (Colle) et Oeid (semi). C'est la suspension d'une au plusieurs substances peuvent être dispersés ou flocculé. Les colloïdes possèdent des charges négatives localisées en surface des particules. Généralement c'est une association de colloïdes de matière organique (humus) et de matière inorganique (argiles minéralogiques) chargés négativement (Archambeaud & Thomas, 2023).

Le complexe colloïdal du sol désigne l'ensemble des particules colloïdales présentes dans le sol, notamment les argiles et la matière organique (humus), qui jouent un rôle crucial dans diverses propriétés du sol, telles que la rétention d'eau, la capacité d'échange cationique (CEC), la fertilité et l'aération. Ces particules colloïdales sont de taille très fine et possèdent des propriétés physiques et chimiques uniques qui influencent directement la capacité du sol à retenir et à échanger des nutriments et des éléments chimiques (Brady & Weil, 2017).

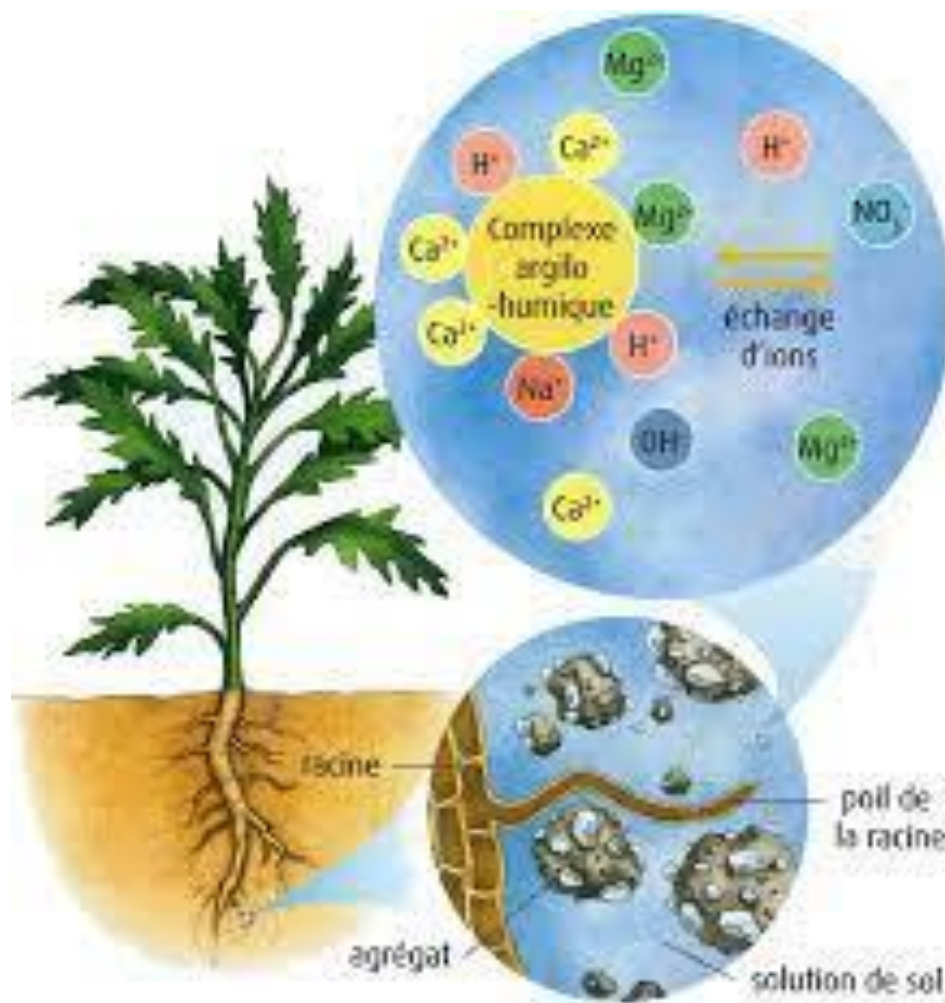


Figure 14. Présentation du complexe colloïdal (Argilo-humique) du sol

Description et Composition du Complexe Colloïdal : Les colloïdes du sol sont des particules extrêmement fines dont la taille varie généralement entre 1 et 100 nanomètres (nm). Elles incluent principalement (Pédrot, 2009) :

- Les particules d'argile : Ce sont des minéraux très fins, dont les surfaces portent des charges négatives. Leur structure est cristalline et leur capacité à retenir l'eau et les nutriments est très élevée.

- La matière organique colloïdale (humus) : C'est une matière organique décomposée qui a une structure colloïdale, elle est riche en charges négatives et joue un rôle dans la rétention de l'eau et des éléments nutritifs.
- Les particules colloïdales dans le sol ont une capacité à interagir avec les ions du sol (cations et anions) grâce à leur surface chargée, ce qui les rend essentielles pour la gestion des nutriments et de l'eau dans les sols.

Propriétés Physiques et Chimiques du Complexe Colloïdal

- Charge négative : Les particules colloïdales de sol, comme les argiles et la matière organique, ont une charge négative sur leur surface. Cette charge négative attire les cations (ions positifs), tels que le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+) et le sodium (Na^+), créant un complexe d'échange cationique (CEC) qui est crucial pour la fertilité du sol (Brady & Weil, 2017).
- Capacité d'échange cationique (CEC) : La CEC est une propriété chimique fondamentale du complexe colloïdal. Elle mesure la capacité du sol à retenir et à échanger des cations. Un sol avec une haute CEC peut retenir davantage de nutriments et les mettre à disposition des plantes. Les sols argileux et riches en matière organique ont une CEC plus élevée que les sols sableux, car les argiles et la matière organique ont plus de sites de charge négative (Hillel, 2003).
- Rétention d'eau : Les colloïdes du sol ont une forte capacité à retenir l'eau. Cette propriété est particulièrement importante pour la régulation de l'humidité du sol et la gestion de l'eau dans l'agriculture. La matière organique, par exemple, peut retenir jusqu'à plusieurs fois son poids en eau (Mathieu & Lozet, 2011).
- Propriétés de floculation et de dispersion : La floculation désigne la tendance des colloïdes du sol (notamment l'argile) à s'agglomérer sous l'action de certains cations (comme le calcium). Cela peut affecter la structure du sol et l'aération. À l'inverse, en présence de cations comme le sodium, les colloïdes peuvent se disperser, ce qui peut conduire à une mauvaise structure du sol (Baize, 2009).

Fonctions du Complexe Colloïdal du Sol (Stevenson F. , 1994)

- Régulation de la disponibilité des nutriments : Le complexe colloïdal joue un rôle crucial dans la régulation de la disponibilité des nutriments. Les cations adsorbés sur les colloïdes peuvent être libérés dans la solution du sol pour être absorbés par les

racines des plantes. C'est ainsi que les sols avec un complexe colloïdal riche, comme les sols argileux ou humifères, sont généralement plus fertiles.

- Interaction avec les contaminants : Le complexe colloïdal peut également jouer un rôle dans la rétention des polluants dans le sol. Les cations et anions polluants peuvent être adsorbés sur les colloïdes, ce qui influence leur biodisponibilité et leur transport dans l'environnement.

Amélioration de la structure du sol : Les colloïdes contribuent à la formation des agrégats de sol, qui améliorent la structure du sol. En formant des complexes avec les particules de sable et de limon, les colloïdes favorisent la porosité du sol, ce qui facilite la circulation de l'air et de l'eau et permet une meilleure pénétration des racines (Bardgett, 2010).

Impact des Colloïdes sur les Propriétés du Sol en Agriculture : Les colloïdes influencent de manière significative les propriétés agronomiques du sol (Brady & Weil, 2008) :

- Fertilité : Les sols avec une forte proportion de colloïdes (surtout d'argile et de matière organique) ont une meilleure capacité à retenir les nutriments, ce qui les rend plus fertiles.
- Gestion de l'eau : Les sols avec un complexe colloïdal actif (par exemple, les sols riches en humus) ont une meilleure capacité de rétention d'eau, ce qui est essentiel pour l'agriculture durable.
- Acidité et alcalinité : La capacité du complexe colloïdal à retenir les cations affecte également le pH du sol. Des échanges cationiques constants permettent de maintenir un pH favorable à la croissance des plantes.

A.3. Organisation morphologique des sols

A.3.1. Organisations élémentaires

Les organisations élémentaires sont de quatre types : les couleurs, les agrégats, les vides et les traits pédologiques. La solidité de ces organisations constitue un critère de description important (Guigaz, 2002).

A.3.1.1 L'interprétation des couleurs

La couverture pédologique est un milieu très coloré : presque tous les sols présentent des variations verticales et latérales de couleur, progressives ou rapides. De ce fait, l'interprétation des couleurs des sols est une méthode importante pour comprendre les processus pédogénétiques (formation du sol), les conditions environnementales et les propriétés du sol.

La couleur d'un sol peut fournir des informations immédiates sur sa composition chimique, son taux d'humidité, sa structure et sa capacité de drainage, ainsi que sur les processus biologiques ou chimiques qui y ont lieu.

Les Principaux Facteurs Affectant la Couleur du Sol : La couleur du sol est influencée par plusieurs facteurs principaux (Baize & Jabiol, 1995):

- Le type de minéraux et leur oxydation : La présence de certains minéraux et leur degré d'oxydation influencent fortement la couleur du sol.
- La teneur en matière organique : Un sol riche en matière organique aura généralement une couleur foncée (noir).
- L'humidité du sol : Un sol saturé d'eau aura une couleur plus terne et peut apparaître plus pâle ou gris.
- Le pH et la chimie du sol : Le pH et les réactions chimiques dans le sol peuvent provoquer des changements de couleur, notamment en ce qui concerne la présence de sels ou de substances acides.
- Les processus biologiques : La décomposition des matières organiques, l'activité des microorganismes, et les racines des plantes influencent également la couleur du sol.

Signification des Différentes Couleurs du Sol (Djama, Ersahin, & Sùnal Kava, 2023) :

- Sol noir ou brun foncé : Les sols de couleur foncée sont souvent riches en matière organique. Ce sont des sols fertiles, généralement en raison de la décomposition de la matière végétale et animale. Ils se trouvent souvent dans les zones de forêts, de prairies ou de marécages. Un sol noir ou brun indique une forte activité biologique et un bon approvisionnement en nutriments (Brady & Weil, 2008).
- Sol rouge ou orange : La couleur rouge ou orange est souvent le résultat de l'oxydation du fer dans les sols. Ces sols sont généralement bien aérés et bien drainés. Les sols rouges sont typiques des régions chaudes et sèches, comme les régions subtropicales, et sont souvent des sols riches en oxyde de fer (hématite) (Jia, Li, Guo, & Xie, 2024).
- Sol jaune : La couleur jaune est également liée à l'oxydation du fer, mais moins avancée que celle des sols rouges. Les sols jaunes sont courants dans des climats plus tempérés, où l'oxydation du fer n'est pas aussi poussée que dans les climats chauds. Ces sols peuvent aussi contenir des minéraux comme la goethite.
- Sol gris ou gris-bleu : Les sols de couleur gris ou bleuâtre sont souvent associés à un manque d'oxygène ou à une mauvaise aération, typiques des zones où l'eau stagne (sols

hydromorphes). Ces sols ont généralement une teneur élevée en fer ferreux (Fe^{2+}), qui est réduit par des conditions de faible oxygénation, donnant ainsi une couleur plus sombre et grisâtre.

- Sol blanc ou pâle : Les sols très pâles, voire blancs, peuvent contenir des sels solubles, comme les sulfates de calcium (gypse) ou de sodium (sel), qui donnent au sol une couleur blanchâtre. Ces sols sont souvent trouvés dans des zones arides ou semi-arides où l'évaporation dépasse les précipitations, entraînant l'accumulation de sels à la surface du sol.
- Sol vert : Les sols verts, bien que rares, peuvent être le résultat de la présence de certaines formes de fer ou d'éléments comme le manganèse ou le cuivre en faible concentration. Les sols verts sont souvent associés à des sols gorgés d'eau où des conditions réductrices sont présentes.

Interprétation basée sur la Chimie et la Pédogenèse : La couleur du sol est également un indicateur des processus chimiques en cours dans le sol, tels que l'oxydation et la réduction des minéraux. Par exemple, les sols rouges et jaunes sont souvent associés à des processus d'oxydation du fer, tandis que les sols gris sont associés à des conditions réductrices (manque d'oxygène) (Kalyani & Prakash, 2022).

- Sols bien aérés et drainés (souvent rouges ou oranges) : Ces sols sont généralement situés dans des régions où l'oxygénation est bonne, favorisant l'oxydation du fer. Cela indique une bonne structure et une fertilité modérée à élevée.
- Sols mal drainés ou saturés en eau (souvent gris ou bleus) : Un sol saturé en eau présente une forte probabilité d'avoir un pH acide ou de contenir des formes réductrices de fer (Fe^{2+}), ce qui empêche l'oxydation. Ces sols sont moins propices à l'agriculture, sauf si des mesures de drainage sont prises.

Méthodes d'Analyse des Couleurs des Sols : Les couleurs des sols sont généralement mesurées à l'aide du Munsell Soil Color Chart, un système standardisé qui permet de décrire les couleurs du sol en termes de teinte (hue), de chroma (intensité) et de valeur (luminosité). Ce système est largement utilisé dans la pédologie et les études de sols pour effectuer une interprétation cohérente et précise des couleurs du sol (Munsell, 1954).

La matière organique, colore en sombre (noir, marron et grise foncé ...)

Le calcaires et les sels, chlorure bicarbonates (Blanc...)

Le fer selon son état (fer ferreux excès d'eau dans une couleur gris bleu, Hydroxyde de Fer $FeO(OH)$ à une couleur Brun à Jaune régime hydrique peut contraster, l'hématite Fe_2O_3 un régime hydrique contraster couleur rouge).

Les mécanismes en jeu, Les mécanismes qui colorient sont ceux qui agissent sur la présence et l'état des constituants : Les activités biologiques, (animales et végétales). Les migrations et accumulations de l'argile, du calcaire, des sels. Les régimes hydriques : les horizons très bien drainés, recevant beaucoup d'eau mais s'asséchant vite et souvent, sont facilement rouges ; les horizons drainant moyennement bien, sont bruns ou jaunes ; les horizons drainant mal, sont gris ou tachetés de gris, de rouille, de jaune ou de noir.

➤ Les couleurs des sols

caractéristiques de la roche et des processus pédogénétiques

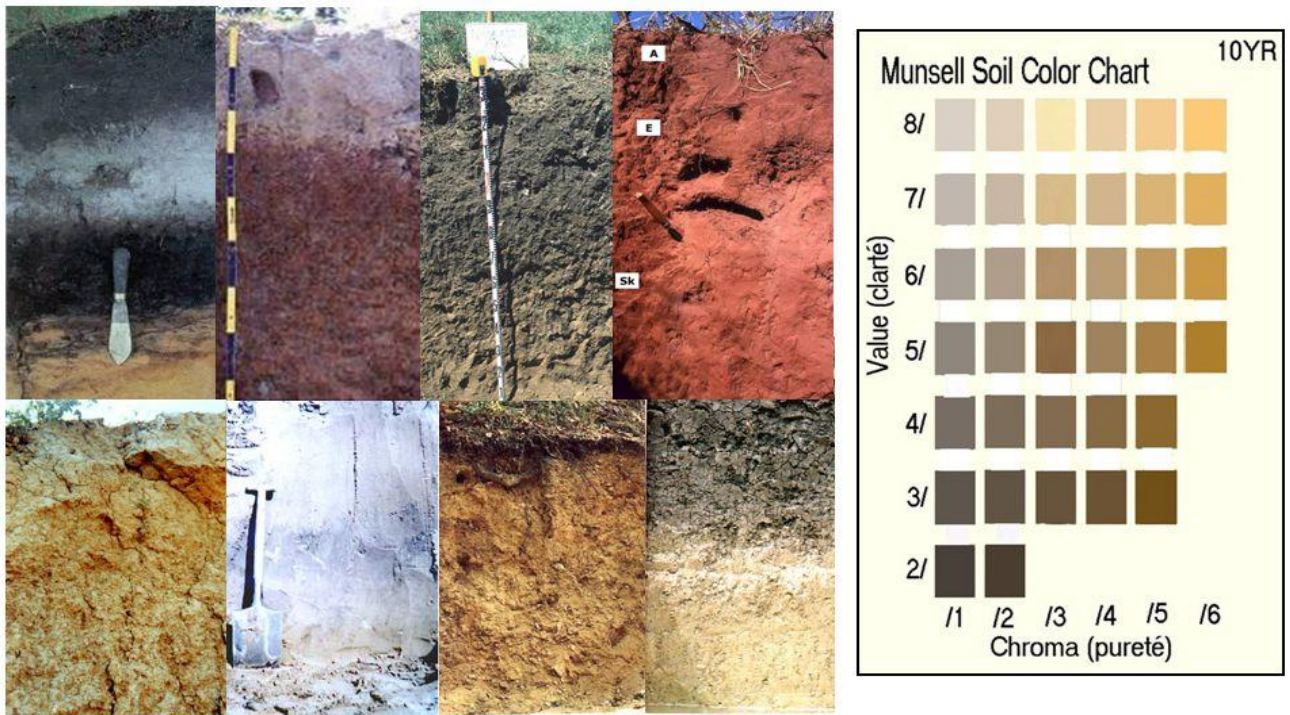


Figure 15. Présentation une variabilité des couleurs du sol et identification par la chart des Color du sol Munsell

A.3.1.2 L'interprétation des agrégats

Le deuxième critère crucial utilisé dans l'interprétation du sol, est l'interprétation des agrégats du sol est essentielle pour comprendre la structure du sol, son fonctionnement et son rôle dans l'environnement. Les agrégats du sol se réfèrent à des groupes de particules de sol liées

ensemble par des forces physiques, chimiques et biologiques. Ces agrégats influencent des propriétés essentielles comme la porosité, l'infiltration de l'eau, l'aération, et la rétention des éléments nutritifs (Denis, Odile, & Guy, 2013). Voici une interprétation détaillée des agrégats du sol :

Stabilité des agrégats du sol : La stabilité des agrégats est un indicateur clé de la qualité de la structure du sol. Un sol stable favorise une meilleure porosité, une bonne infiltration de l'eau, et réduit l'érosion. L'agrégation du sol peut être influencée par la teneur en matière organique, les racines des plantes et l'activité microbienne (Fritz, Lauer, Wilkenine, Masson, & Peth, 2021).

- Agrégats stables : Ces agrégats sont résistants à la rupture sous l'action de l'eau, des racines des plantes, ou des forces mécaniques. Ils forment des réseaux de pores qui facilitent l'infiltration de l'eau, la circulation de l'air et la croissance des racines.
- Agrégats instables : Les sols dont les agrégats sont instables tendent à se désagréger facilement, conduisant à la formation de boues et à la compaction. Cela peut entraîner des problèmes d'érosion et une mauvaise gestion de l'eau.

Impact de la matière organique sur les agrégats : La matière organique joue un rôle central dans la formation et la stabilisation des agrégats. Les substances organiques (humus, exsudats racinaires, micro-organismes) agissent comme des liants naturels entre les particules de sol. Elle améliore la cohésion des agrégats et renforce leur résistance à la dégradation (Pagliai, Vignozzi, & Pellegrini, 2004,).

- Haute teneur en matière organique : Des sols riches en matière organique favorisent une bonne agrégation et augmentent la stabilité des agrégats. La matière organique forme des ponts biologiques et chimiques entre les particules du sol.
- Faible teneur en matière organique : Les sols pauvres en matière organique ont tendance à avoir des agrégats moins stables, ce qui conduit à une plus grande susceptibilité à l'érosion et à la compaction.

Taille des agrégats et ses implications : La taille des agrégats a un impact direct sur la porosité du sol et ses propriétés d'infiltration d'eau. Des agrégats de taille appropriée sont essentiels pour maintenir un bon équilibre entre la rétention d'eau et le drainage (Day, 1965).

- Agrégats grossiers (> 2 mm) : Des agrégats plus gros favorisent une meilleure aération et un drainage adéquat. Ils permettent également aux racines des plantes de pénétrer plus facilement dans le sol.
- Agrégats fins (< 2 mm) : Les agrégats fins, souvent dominants dans les sols compactés ou mal aérés, entraînent une plus faible aération et peuvent conduire à une stagnation de l'eau, créant des conditions anaérobies et nuisibles aux racines.

La relation entre les agrégats et la structure du sol : La structure du sol est directement influencée par l'agrégation. Une bonne structure est caractérisée par un agencement optimal des agrégats, ce qui permet une bonne répartition de l'eau, une aération adéquate, et une facilité de circulation des racines (Baize & Jabiol, 1995; Tisdall & Oades, 1982).

- Sols bien structurés : Ces sols, avec des agrégats cohérents et bien organisés, favorisent une croissance saine des plantes. Les agrégats permettent une circulation efficace de l'eau et de l'air, réduisant les risques de compaction et d'érosion.
- Sols mal structurés : Les sols avec une structure dégradée ou compactée, où les agrégats sont soit trop petits, soit très grossiers, ont des performances médiocres en matière de gestion de l'eau et de développement des racines.

Rôle des micro-organismes dans l'agrégation : Les micro-organismes du sol, tels que les bactéries, les champignons, et les actinobactéries, jouent un rôle crucial dans l'agrégation des sols. Ils contribuent à la formation de biofilms et à l'exsudation de substances organiques qui agissent comme des agents de liaison entre les particules du sol (Six, Elliott, Paustian, & Doran, 1998).

- Micro-organismes et agrégation : Les micro-organismes favorisent la production de substances organiques qui maintiennent les particules de sol agrégées. Ils sont particulièrement importants dans les sols riches en matière organique, où l'activité microbienne est plus intense.
- Dysfonctionnement microbien : Si la biodiversité microbienne est perturbée, par exemple par des traitements chimiques excessifs, l'agrégation peut être altérée, rendant les agrégats plus fragiles et moins stables.

Agrégats et érosion : Les agrégats du sol jouent un rôle direct dans la résistance du sol à l'érosion. Des agrégats stables limitent l'érosion en maintenant la structure du sol intacte, même sous des conditions climatiques extrêmes (Ghidey & Alberts, 1997).

- Agrégats stables : Ces sols résistent mieux aux forces érosives telles que la pluie ou le vent. Une bonne agrégation empêche les particules fines de se détacher et d'être transportées.
- Agrégats instables : Les sols avec des agrégats instables sont plus susceptibles à l'érosion, car les particules fines se détachent plus facilement sous l'action de l'eau ou du vent, ce qui aggrave la perte de sol et la pollution de l'eau.

A.3.1.3 L'interprétation des vides

Le troisième critère d'interprétation qui semble importante est l'interprétation des vides du sol est cruciale pour comprendre le comportement de l'eau, de l'air et des nutriments dans le sol, ainsi que la façon dont ces éléments influencent la croissance des plantes. Les vides dans le sol, également appelés pores, sont les espaces entre les particules solides du sol. Ces pores varient en taille et en forme, et leur distribution et leur connectivité influencent directement les propriétés du sol, comme la perméabilité, la capacité de rétention d'eau, et la disponibilité des nutriments (Eldin, 1989). Voici une interprétation détaillée des vides dans le sol, suivie de références pour approfondir chaque aspect.

Nature et Types de Vides du Sol : Les vides du sol se distinguent principalement par leur taille, et sont classés en deux catégories principales :

- Macropores (grands pores) : Ces pores ont un diamètre supérieur à 0,08 mm et sont responsables de l'aération du sol ainsi que du drainage rapide de l'eau. Ils permettent à l'air de circuler facilement dans le sol et sont essentiels pour le développement des racines.
- Micropores (petits pores) : Ces pores sont plus petits, généralement inférieurs à 0,08 mm, et retiennent l'eau plus longtemps. Ils sont responsables de la rétention d'eau dans le sol, en particulier l'eau disponible pour les plantes, bien qu'une partie de cette eau soit à une tension trop élevée pour être facilement accessible par les racines.
- Les mesopores se situent entre ces deux catégories et ont des tailles intermédiaires. Ils peuvent jouer un rôle crucial en permettant la rétention d'une quantité modérée d'eau.

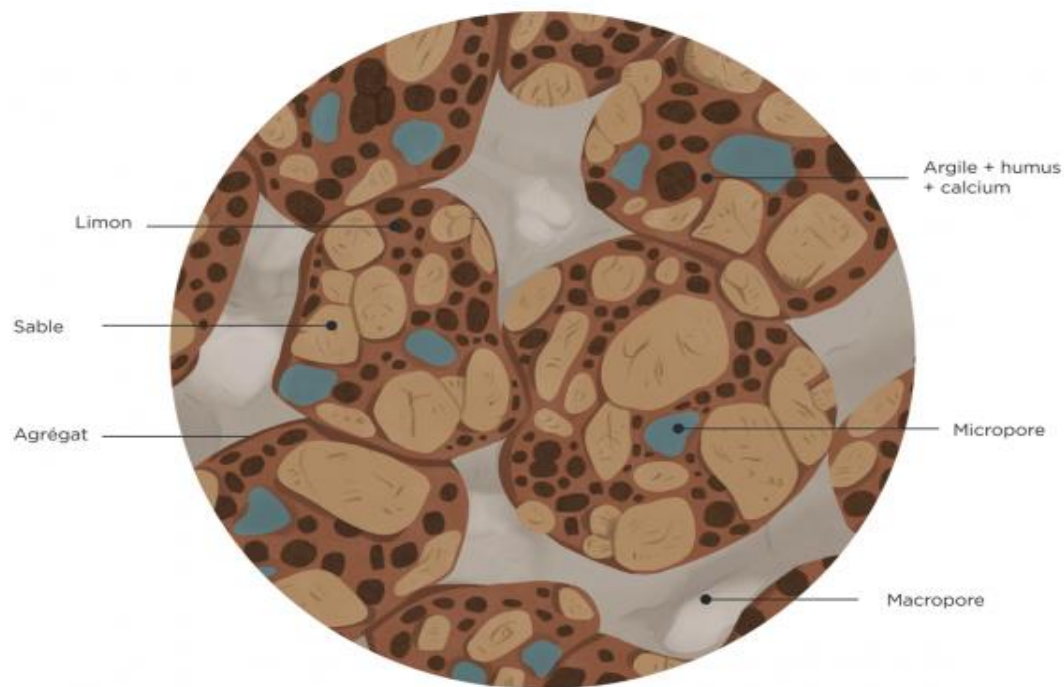


Schéma de structure du sol

Figure 16. Présentation schématique des pores du sol

Rôle des Vides dans la Gestion de l'Eau : L'un des rôles les plus importants des vides du sol est de gérer la circulation de l'eau dans le sol. Les macropores permettent à l'eau de pénétrer rapidement lors des pluies, mais l'eau qui reste dans les micropores est celle qui est utilisée par les plantes (Hillel, 2003).

- Capacité de rétention d'eau : Les micropores jouent un rôle essentiel dans la rétention d'eau. La quantité d'eau retenue dépend de la taille et de la connectivité des micropores. Une bonne proportion de micropores permet à l'eau de rester disponible pour les racines des plantes. En revanche, des sols avec une prédominance de macropores, comme les sols sableux, peuvent avoir une faible capacité de rétention d'eau.
- Drainage et infiltration : Les macropores permettent un bon drainage et une infiltration rapide de l'eau, ce qui est essentiel pour éviter l'excès d'eau dans le sol qui pourrait asphyxier les racines.

Relation entre Vides et Aération : L'aération du sol est essentielle pour la santé des racines et pour les processus biologiques dans le sol. Les racines des plantes, ainsi que les micro-organismes bénéfiques, ont besoin d'oxygène pour se développer. Les macropores sont responsables de la circulation de l'air dans le sol. Un sol bien aéré a une proportion élevée de macropores, permettant à l'oxygène de se diffuser dans les zones racinaires (Tisdall & Oades, 1982).

- Sols bien aérés : Des sols avec une proportion adéquate de macropores facilitent l'échange d'air, ce qui est nécessaire pour la respiration racinaire et la dégradation de la matière organique par les micro-organismes.
- Sols mal aérés : Lorsque les vides sont trop petits ou peu nombreux, comme dans les sols compactés ou gorgés d'eau, l'air ne peut pas circuler correctement, ce qui peut entraîner une asphyxie des racines et limiter l'activité biologique.

Vides et Texture du Sol : La texture du sol, c'est-à-dire la proportion de sable, de limon et d'argile, influence la taille, la distribution et la capacité des vides. La texture du sol affecte directement les propriétés des pores (Barker & Pilbeam, 2015).

- Sols sableux : Les sols sableux ont de grands macropores, ce qui facilite le drainage rapide de l'eau. Cependant, ils ont aussi une faible capacité de rétention d'eau, car l'eau ne peut pas être retenue dans les micropores pendant longtemps.
- Sols argileux : Les sols argileux ont une grande proportion de micropores, ce qui leur permet de retenir plus d'eau, mais ils peuvent souffrir de drainage insuffisant et d'aération limitée. Les sols argileux peuvent retenir de grandes quantités d'eau, mais celle-ci n'est pas toujours disponible pour les plantes.
- Sols limoneux : Ils ont un équilibre entre macropores et micropores, permettant une rétention d'eau et une aération optimale pour la croissance des plantes.

Compaction du Sol et Vides : La compaction du sol, souvent causée par le passage d'engins agricoles ou le piétinement du sol, réduit la taille et la connectivité des pores. Cela a un impact direct sur l'aération et le drainage du sol, rendant le sol plus dense et moins perméable. (Shaheb, Venkatesh, & Shearer, 2021)

- Sol compacté : Lorsque le sol est compacté, les macropores sont écrasés et les micropores deviennent moins accessibles pour l'eau et l'air. La compaction peut réduire

la porosité totale du sol, ce qui entraîne une infiltration d'eau plus lente, une mauvaise aération et un risque accru d'asphyxie des racines.

- Sols non compactés : Un sol non compacté, avec des pores bien développés, permet une bonne circulation de l'air et de l'eau, favorisant une meilleure croissance des racines et une meilleure gestion de l'eau.



Figure 17. Photo représentative sur l'impact des sols compacte sur la perméabilité de l'eau

Activité Microbienne et Vides du Sol : Les vides du sol, en particulier les macropores, sont importants pour la circulation de l'air, ce qui est essentiel pour les micro-organismes du sol. Les micro-organismes, tels que les bactéries et les champignons, sont responsables de la dégradation de la matière organique et de la minéralisation des nutriments (Doran, Coleman, Bezdicsek, & Stewar, 1994).

- Sols aérés : Des sols bien aérés avec une bonne proportion de macropores soutiennent une activité microbienne saine, ce qui contribue à la fertilité du sol.

- Sols mal aérés : Des sols avec une faible aération, en raison de l'absence de macropores, peuvent réduire l'activité microbienne, limiter la dégradation de la matière organique et affecter la disponibilité des nutriments pour les plantes.

A.3.1.4 L'interprétation des traits pédologique

Le quatrième caractère morphologique concerne mouvements et dépôts de particules, argileuses, limoneuses, sableuses ; mouvements et précipitations d'éléments en solution : calcaire, sels, matières organiques ; mouvements des animaux et des racines ; gonflement des argiles. Ces mouvements et transferts aboutissent à la création de traits pédologiques : revêtements, nodules, bandes, pédotubules.

A.3.1.4.1 Les revêtements

Il s'agit de fines pellicules, recouvrant les parois de vides. Les revêtements les plus connus sont argileux ; mais il existe aussi, très fréquemment, des revêtements calcaires, ferriques, alumineux, siliceux, organiques, gypseux, salés ; et il y a aussi des revêtements limoneux ou sableux.

Les revêtements sont minces pellicules d'argiles, de sesquioxydes ou de matière organique, continues ou discontinues, d'épaisseurs variées, moulant les agrégats, les canalicules ou colmatant les pores du sol. Les revêtements argileux ("clay skins") orientés signalent une illuviation. Ils caractérisent l'horizon argilique (Maignibn, 1969).

A.3.1.4.2 Les nodules :

Les nodules sont des concentrations plus ou moins sphériques, soit d'éléments ayant migré en solution, soit d'éléments résiduels de ces migrations : dans les deux cas, ils correspondent à une accumulation de matière, absolue ou résiduelle. Les nodules les plus fréquents sont les nodules calcaires et les nodules d'hydroxyde de fer (Chukhrov & Gorshkov, 1981).

- Nodules minéraux : Les nodules peuvent être constitués de matériaux tels que les oxydes de fer ou de manganèse, souvent visibles dans les sols hydromorphes ou les sols où il y a un excès de matière organique en décomposition. Ces nodules peuvent également se former à partir de l'argile ou de calcaire dans certains sols calcaires.
- Nodules biologiques : Ce sont des structures formées par l'interaction des racines des légumineuses et des bactéries fixatrices d'azote (Rhizobium). Ces nodules sont souvent visibles au niveau des racines et sont essentiels pour la fixation de l'azote atmosphérique, ce qui augmente la fertilité du sol.

Les nodules contenant des oxydes de fer ou de manganèse indiquent souvent un sol gorgé d'eau ou un sol hydromorphe avec des processus d'oxydation et de réduction actifs.

Les nodules racinaires sont un signe d'une activité biologique et d'un enrichissement en azote, bénéfique pour les plantes.

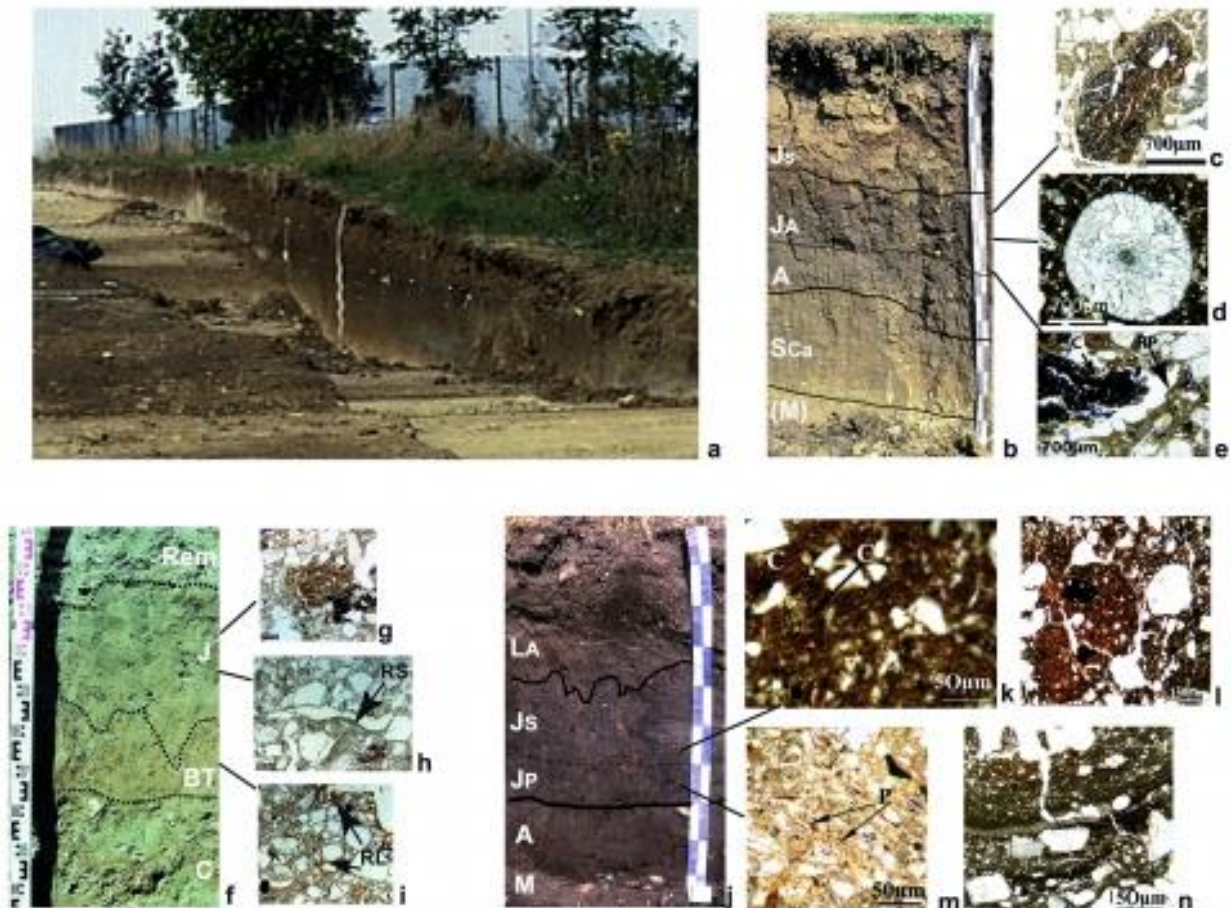


Figure 18. Photos présentatives de quelques nodules et revêtements pédologique (Gebhardt, Occhietti, & Fechner, 2014).

A.3.1.4.3 Les bandes

Les bandes constituent, au sein d'horizons à texture grossière sablo-limoneuse, des feuillettes, d'épaisseur millimétrique ou centimétrique, plus riches en argile, ou en fer, ou en matière organique. Longtemps considérées comme des figures sédimentaires.

Donc sont des bandes de couleur dans les horizons du sol, qui sont des caractéristiques observées dans les profils pédologiques. Ces bandes peuvent être formées par des variations dans la texture, la structure, la teneur en éléments chimiques (par exemple, le fer, le manganèse, ou le calcium), ou encore par des processus biologiques et pédogénétiques. Elles sont souvent utilisées par les pédologues pour interpréter l'histoire et les propriétés du sol. De ce fait on

trouve différentes bandes dans les horizons du sol, y compris leur signification et leur interprétation.

Bandes de Fer et Manganèse (Oxydation/Réduction) : Les bandes de fer et de manganèse sont des bandes colorées observées dans certains sols, surtout dans des sols hydromorphes, et sont généralement liées à des variations dans les conditions d'oxydation et de réduction du sol (Vepraskas, 2015).

- Bandes rouges et oranges : Ce sont des taches d'oxydes de fer. Elles apparaissent dans les sols où l'oxygène est présent, souvent dans des horizons bien aérés ou bien drainés. Les oxydes de fer (comme l'hématite) donnent au sol des couleurs rougeâtres ou orangées. Ces bandes sont fréquentes dans des horizons supérieurs, comme l'horizon A ou l'horizon E.
- Bandes grises et bleues : Ce sont des bandes de réduction de fer, qui se forment sous des conditions saturées en eau, où le fer est réduit à l'état ferreux. Les bandes grisâtres ou bleuâtres indiquent un manque d'oxygène, typique des sols mal aérés (comme dans les sols gorgés d'eau ou les marais). Ces bandes sont généralement visibles dans les horizons B ou C, qui sont situés plus profondément dans le profil du sol.

De ce fait, les bandes rouges et oranges indiquent un sol bien drainé, avec une bonne aération et un faible taux de saturation en eau.

Cependant que les bandes grises et bleues signalent un sol hydromorphe, saturé en eau, ou un sol où les processus de réduction sont dominants, souvent dans les zones sujettes à des inondations ou une forte nappe phréatique.

Bandes de Calcification (Calcarisoles) : Les bandes de calcification sont caractéristiques des sols calcaires ou alcalins, où l'accumulation de carbonate de calcium (CaCO_3) forme des bandes ou des couches visibles dans le profil du sol.

Bandes blanches ou grisâtres : Ces bandes sont souvent formées par la précipitation de sels de calcium (comme le carbonate de calcium, CaCO_3). Elles se forment lorsque l'eau se déplace dans le sol, dissolvant les minéraux solubles et les précipitant dans les horizons plus profonds ou moins humides. Les bandes calcaires sont fréquemment observées dans les sols de type aride ou semi-aride (Weil & Brady, 2016).

Les bandes de calcification indiquent un sol où les processus de décarbonatation sont actifs. Elles peuvent également signaler des sols sous des conditions sèches où les sels solubles sont déplacés et précipités par les changements de l'humidité.

La présence de ces bandes dans un horizon profond peut également indiquer une faible activité biologique ou une faible circulation d'eau dans le sol.

A.3.1.4.4 Les pédotubules

On appelle pédotubules des volumes pédologiques que l'on peut interpréter comme étant le résultat de l'activité biologique animale : boulettes fécales, agrégats finement grenus résultant de l'activité des vers de terre, constructions, au sein des sols, par les fourmis ou les termites, volumes centimétriques résultant des transports de terre, à l'intérieur du sol, par des taupes, des chiens de prairie, des rats, etc.

Les pédotubules sont des structures tubulaires ou canaux dans le sol qui résultent de la perturbation ou de la translocation de particules ou de substances au sein du profil du sol. Ces structures peuvent se former en raison de processus physiques, chimiques ou biologiques. Ce terme est principalement utilisé dans le cadre des soils (sols) à forte activité biologique ou dans des sols où des phénomènes physiques comme l'irrigation, la compaction ou le gel/dégel sont présents (Oades, 1984).

Les pédotubules peuvent être naturels (formés par des organismes biologiques ou par des processus naturels) ou anthropiques (créés par l'homme, souvent lors de travaux agricoles ou d'autres interventions humaines) (Fig. 19).

Formation des pédotubules : Les pédotubules peuvent se former par plusieurs processus (Clive & Arancon, 2022) :

- Par l'activité biologique : L'activité des vers de terre est l'une des causes principales de la formation de pédotubules dans le sol. Ces organismes creusent des galeries (ou canaux) en déplaçant des particules de sol pour créer des tunnels dans le sol. Ces tunnels permettent non seulement d'améliorer l'aération du sol, mais aussi la pénétration de l'eau et des racines. Dans ce cas, on parle de pédotubules biologiques. Ces galeries peuvent être de différentes tailles, allant de minuscules canaux créés par des insectes à des galeries plus grandes laissées par des vers de terre. Action des racines, les racines des plantes peuvent également créer des canaux ou des tubules dans le sol en se développant à travers les couches du sol à la recherche d'eau et de nutriments. Ces

structures sont souvent plus petites mais peuvent être considérées comme des pédotubules biologiques.

- Par des phénomènes physiques : Gèle-Dégel, dans les régions où le gel et le dégel alternent, le processus de gel-dégel peut provoquer la formation de fissures et de canaux dans les horizons supérieurs du sol. Le pédotubule peut se former par des fractures dues à l'expansion de l'eau gelée et à la contraction lors du dégel, ce qui peut perturber la structure du sol. Ces canaux, créés par la dilatation et la contraction de l'eau, facilitent l'infiltration de l'eau dans les sols et peuvent également améliorer la structure du sol à long terme. La pression hydrodynamique, par l'infiltration de l'eau dans les sols argileux ou sablonneux peut créer des canaux qui se déplacent vers des zones plus profondes, permettant ainsi l'amélioration de la structure du sol et favorisant la circulation de l'air et des nutriments.
- Par des processus anthropiques : Tracteurs et machines agricoles, donc l'utilisation de machines agricoles, notamment des tracteurs ou des outils de labour, peut aussi créer des canaux ou des passages dans le sol qui sont parfois qualifiés de pédotubules. Bien que ces canaux soient généralement plus larges et plus réguliers que ceux formés par des organismes biologiques, ils peuvent jouer un rôle similaire en améliorant l'aération et la perméabilité du sol. D'un autre côté la construction et aménagement du sol avec l'urbanisation et les travaux agricoles peuvent perturber la structure du sol de manière à créer des canaux ou des zones de passage, contribuant à la formation de pédotubules artificiels.

L'importance et l'interprétation des pédotubules (Schaetzl & Anderson, 2005):

- Indicateur de l'activité biologique : Les pédotubules formés par des organismes vivants, comme les vers de terre, sont souvent un signe d'un sol vivant et dynamique, où l'activité biologique est forte. La présence de pédotubules dans un sol peut indiquer que ce dernier a une bonne structure et une bonne porosité, ce qui facilite l'infiltration de l'eau et le développement des racines des plantes.
- Amélioration de la structure du sol : Les pédotubules améliorent la structure du sol en facilitant l'infiltration de l'eau, en réduisant le risque d'érosion et en permettant une meilleure aération des horizons profonds. En créant un réseau de canaux, les pédotubules aident à transporter les nutriments et à améliorer la disponibilité de l'eau pour les plantes.

- Évaluation de la perméabilité : Les pédotubules peuvent être un indicateur de la perméabilité du sol. Un sol avec un grand nombre de pédotubules biologiques est souvent plus perméable, ce qui est favorable à l'agriculture et à la croissance des racines.
- Indicateur de l'état du sol sous stress : La formation de pédotubules peut aussi indiquer un sol sous stress. Par exemple, un sol compacté par l'agriculture ou la construction pourrait former des canaux artificiels plus larges, qui sont moins efficaces pour améliorer la qualité du sol sur le long terme.

Exemples de pédotubules (Schaetzl , Mikesell , & Velbel, 2006):

- Les galeries de vers de terre : Les vers de terre, en creusant des galeries pour se déplacer et rechercher leur nourriture, génèrent des pédotubules. Ces structures sont particulièrement visibles dans les sols humides et bien aérés et jouent un rôle clé dans la structure du sol. Les canaux laissés par ces vers permettent à l'air et à l'eau de pénétrer plus facilement dans le sol.
- Les fissures dans les sols gelés : Dans les régions où le sol subit des cycles de gel et de dégel, la formation de fissures et de canaux est fréquente. Ces pédotubules sont souvent visibles sous forme de fissures verticales dans les horizons supérieurs du sol, qui permettent une meilleure pénétration de l'eau pendant les périodes de dégel.
- Les canaux créés par les racines des plantes : Les racines des plantes peuvent également former des pédotubules en creusant des passages dans le sol. Ces canaux, bien qu'étroits, facilitent la circulation de l'eau et des éléments nutritifs dans le sol. De plus, la décomposition des racines peut favoriser la formation de nouvelles structures de pédotubules biologiques.

pédoflore

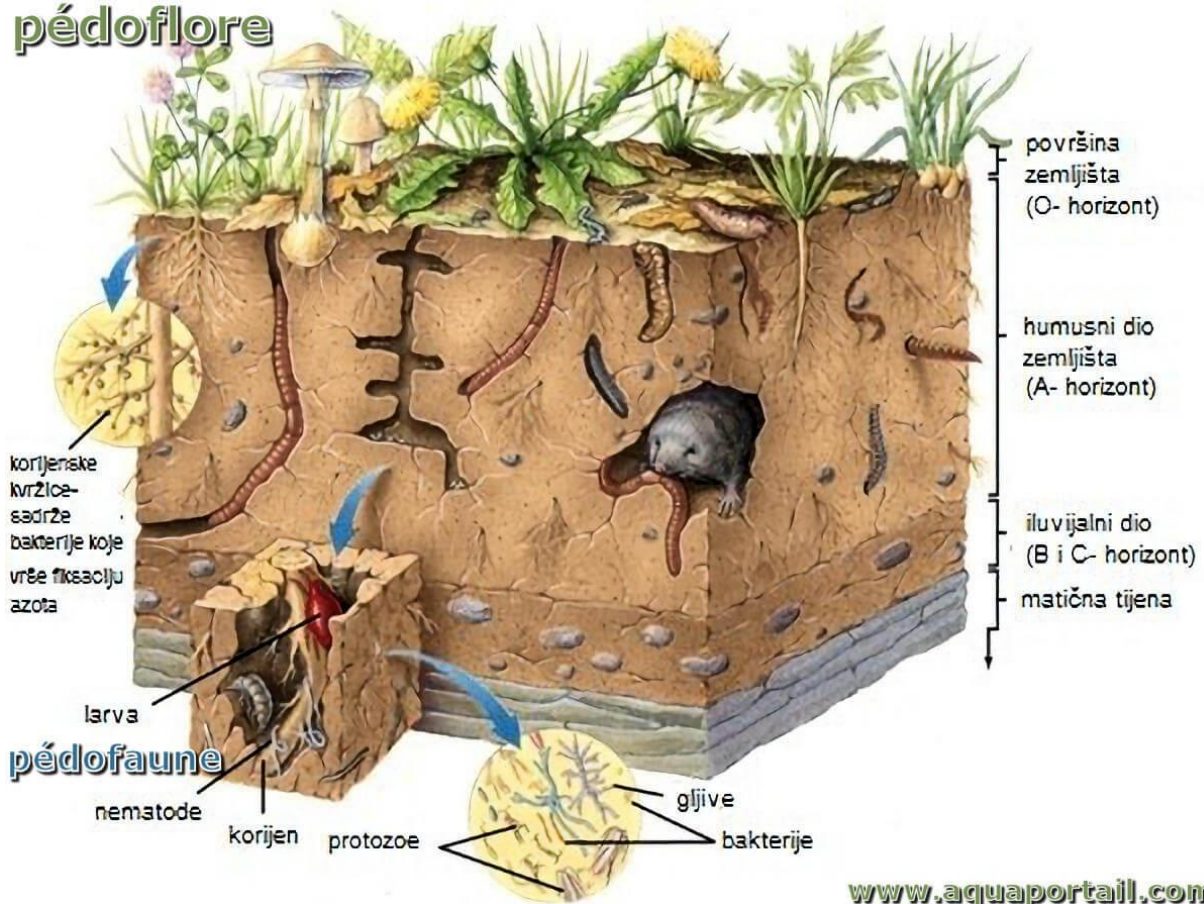


Figure 19. Schéma présentatif de l'activité biologique et son impact sur la fertilité des sols.

A.4. Les Horizons pédologiques

Au fur et à mesure de son évolution, le sol s'approfondit, se différencie en couches successives, les horizons, grossièrement parallèles à la surface du sol. Il forme une très mince couche de quelques décimètres, parfois de quelques mètres. L'ensemble des horizons constituent un profil (appelé aussi pédon) que l'on observe sur une coupe en deux dimensions, sans oublier que ces couches forment un ensemble tridimensionnel. Les horizons sont désignés par une succession de lettres (Fig. 20) (Calvet, 2003).

En effet les horizons du sol sont des couches distinctes qui se forment dans le profil du sol à travers des processus pédogénétiques tels que l'altération, l'érosion, l'accumulation de matière organique, et l'activité biologique. Ces horizons sont généralement décrits par des lettres qui reflètent leur composition, leur origine et leurs caractéristiques physiques et chimiques (Mathieu, 2009).

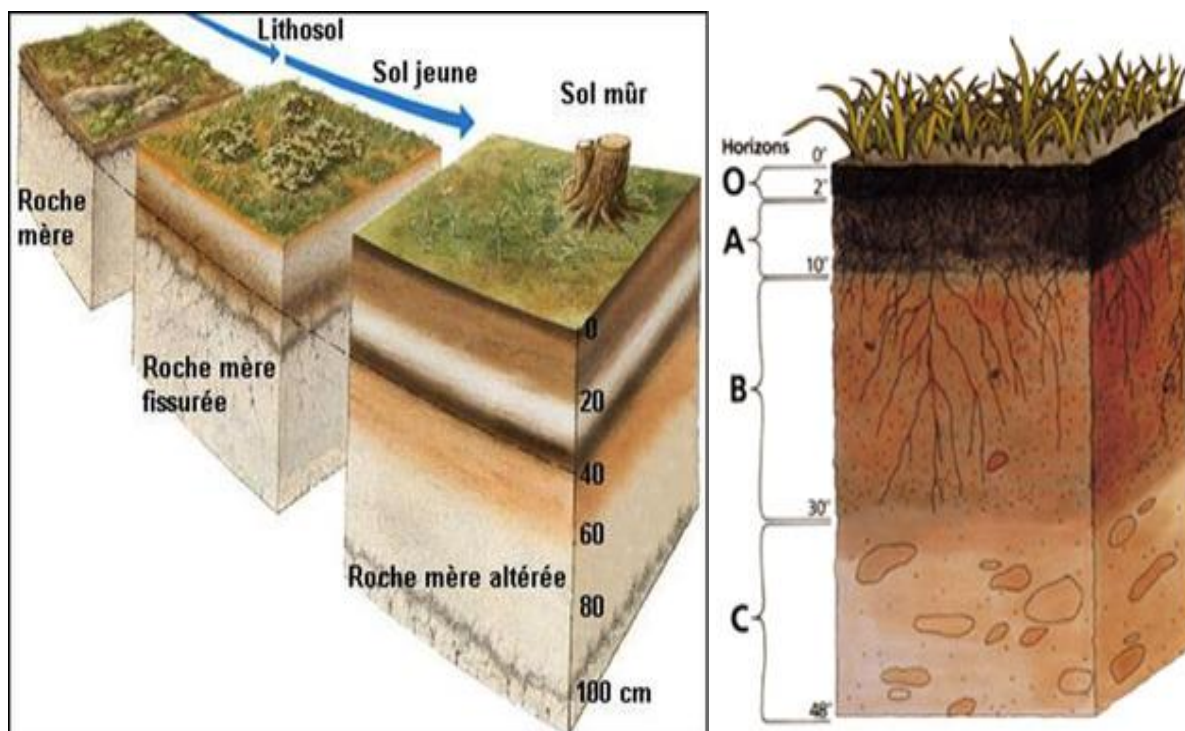


Figure 20. Présentation de différents horizons du sol avec processus de formation

En dessous en donne une explication plus détaillée sur les principaux horizons du sol (Jenny, 1980) :

A.4.1. Horizon O (ou horizon organique)

Description : L'horizon O est principalement constitué de matière organique en décomposition, y compris des feuilles, des racines, et d'autres débris végétaux. Cet horizon est souvent noir ou brun foncé en raison de la présence de matière organique en décomposition.

Composition : Il contient principalement de la matière organique, en particulier des humus et des résidus végétaux qui se transforment par décomposition biologique. Il peut aussi inclure des microorganismes et des insectes qui participent à la dégradation de cette matière.

Caractéristiques : L'horizon O est essentiel pour la fertilité du sol, car il est riche en nutriments. Cet horizon est souvent plus épais dans les zones forestières ou les prairies que dans les sols cultivés. Il peut être divisé en plusieurs sous-couches :

- Oa : Matière organique bien décomposée (humus).
- Oe : Matière organique partiellement décomposée.
- Oi : Débris végétaux frais, non décomposés.

Exemples de sols : On retrouve cet horizon principalement dans les sols forestiers, les tourbières, et les zones humides.

A.4.2. Horizon A (ou horizon superficiel)

Description : L'horizon A est un horizon fertile, souvent appelé la couche arable, et il est constitué d'un mélange de matière organique et de particules minérales. C'est dans cet horizon que se trouve la majeure partie des racines des plantes et où se produisent les échanges biologiques et chimiques essentiels.

Composition : L'horizon A contient des minéraux (sable, limon, argile), mais aussi une quantité importante de matière organique décomposée. C'est un horizon où les processus de minéralisation, de dégradation organique, et d'accumulation des nutriments sont intenses.

Caractéristiques : Cet horizon est souvent de couleur plus claire que l'horizon O, mais il peut être très sombre en raison de la forte teneur en matière organique. L'horizon A est celui qu'on rencontre dans les sols agricoles et les prairies.

Exemples de sols : Cet horizon est courant dans les sols agricoles et les zones forestières où la végétation est dense. L'épaisseur de cet horizon peut varier en fonction de l'activité biologique et des apports en matière organique.

On trouve aussi des sous-catégories :

- A1 : Zone où se concentre la matière organique décomposée.
- A2 : Zone plus minéralisée, souvent soumise à lilluviation (lessivage de matières solubles).

A.4.3. Horizon E (ou horizon d'éluviation)

Description : L'horizon E est un horizon où se produit un processus appelé éluviation. Cela signifie qu'il y a une perte de matériaux solubles ou fines en raison du lessivage par l'eau. Cet horizon est souvent plus clair que les autres horizons à cause de la perte de minéraux.

Composition : L'horizon E est principalement constitué de minéraux lessivés, souvent des argiles, des sels, et des minéraux solubles (comme le fer et l'aluminium). Il est généralement pauvre en matière organique, car beaucoup de matériaux sont emportés par l'infiltration de l'eau.

Caractéristiques : L'horizon E apparaît souvent comme une couche claire, presque blanchâtre, due à la perte de la fraction fine (argiles, minéraux lessivés). Il se forme dans les sols bien drainés, où les précipitations d'eau entraînent le lessivage des éléments solubles.

Exemples de sols : Cet horizon se retrouve fréquemment dans des sols forestiers, où le lessivage est important, notamment dans des sols avec une forte pluviométrie.

A.4.4. Horizon B (ou horizon d'illuviation)

Description : L'horizon B est un horizon où se produit un processus appelé illuviation, qui consiste à l'accumulation de matériaux provenant des horizons supérieurs (en particulier l'horizon E). C'est un horizon d'accumulation.

Composition : L'horizon B contient des minéraux (argile, oxydes de fer et d'aluminium, sels), mais aussi des éléments lessivés en provenance des horizons supérieurs. Par exemple, des minéraux d'argile et du fer peuvent s'y accumuler après avoir été transportés par l'eau.

Caractéristiques : L'horizon B peut être difficile à distinguer de l'horizon C, mais il est généralement plus compact, plus riche en minéraux, et moins riche en matière organique que l'horizon A. Il joue un rôle clé dans la réserve de nutriments pour les plantes.

Exemples de sols : Cet horizon est souvent retrouvé dans les sols bruns, les sols podzoliques, et les sols forestiers.

On trouve aussi comme des sous-catégories :

- B1 : Accumulation de matière organique ou de minéraux.
- B2 : Accumulation d'argile ou d'oxydes métalliques.

A.4.5. Horizon C (ou horizon substratum)

Description : L'horizon C est constitué de matériaux parentaux ou substratum qui n'ont pas subi de transformations pédogénétiques importantes. C'est l'horizon à partir duquel le sol se forme, mais il ne subit pas encore les processus de transformation du sol comme l'altération ou l'accumulation des minéraux.

Composition : Il est principalement constitué de roches brisées, de sables, de graviers, de minerais et de résidus non altérés. L'horizon C peut aussi inclure des roches mères ou des dépôts de matériaux d'origine fluviatile ou glaciaire.

Caractéristiques : Cet horizon est plus peu altéré par les processus de pédogénèse et ne contient généralement pas de matière organique. Il est souvent très compact et peut être dur ou difficile à pénétrer.

Exemples de sols : L'horizon C se trouve sous les autres horizons et est principalement constitué de roches-mères. Il peut aussi inclure des dépôts alluviaux ou des sédiments d'origine volcanique.

A.5. Profils pédologiques

Le profil pédologique est l'ensemble des différentes couches ou horizons qui composent un sol. Il est une représentation verticale du sol depuis la surface jusqu'au substratum rocheux. Chaque horizon du profil pédologique présente des caractéristiques distinctes résultant de processus pédogénétiques comme l'altération, l'érosion, la bioturbation et l'accumulation de matière organique, et ces caractéristiques peuvent varier selon les conditions climatiques, la végétation, la faune, et l'activité humaine.

Pour étudier le profil d'un sol (à savoir la succession et l'épaisseur des différents horizons qui le composent), on aménage une fosse verticale d'un ou deux mètres de profondeur en creusant perpendiculairement à travers le sol (Fig.21).

A.5.1. Utilisation et importance du profil pédologique

Le profil pédologique est essentiel pour comprendre la fertilité des sols, la gestion agricole, la gestion des ressources en eau, et l'étude de la qualité environnementale. Les professionnels de l'agronomie, de l'urbanisme, et de la gestion des sols l'utilisent pour déterminer la structure du sol, son aptitude à supporter certaines cultures, ou encore sa vulnérabilité à l'érosion (Nyle & Brady , 2014).

- Agriculture : En comprenant la profondeur et les caractéristiques des horizons du sol, les agriculteurs peuvent mieux adapter leurs pratiques de gestion, comme la fertilisation et l'irrigation.
- Gestion de l'eau : Le profil pédologique permet de connaître la capacité de rétention d'eau d'un sol, sa perméabilité, et ainsi de gérer efficacement les ressources en eau, notamment dans les zones arides.
- Conservation des sols : En étudiant les horizons et leur évolution, il est possible de mieux comprendre les risques d'érosion ou de dégradation du sol, et d'adopter des mesures pour les prévenir.

A.5.2. Réalisation d'un profil pédologique

Dans le cadre de réaliser le profil pédologique nous devons suivre les étapes suivantes

A.5.2.1 Choisir un site d'étude

Avant de réaliser un profil pédologique, il est essentiel de sélectionner un site représentatif du type de sol que vous souhaitez étudier. Le site doit être choisi en fonction des objectifs de l'étude (par exemple, étude de sols agricoles, forestiers, ou urbains). Il est important de tenir compte des facteurs suivants :

- Topographie : Choisissez un site dont la pente est modérée pour éviter les biais liés à l'érosion ou au lessivage excessif.
- Climat : Le type de climat peut influencer la formation du sol (par exemple, les climats humides génèrent des sols différents de ceux des climats secs).
- Type de sol : Choisissez un sol qui présente des caractéristiques spécifiques que vous souhaitez étudier (par exemple, un sol forestier, un sol argileux, ou un sol sableux).

A.5.2.2 Préparer les outils nécessaires

Pour réaliser un profil pédologique, il est important de disposer des outils adéquats pour creuser, prélever des échantillons et observer les horizons du sol. Voici les principaux outils utilisés :

- Pelle ou tarière : Pour creuser le sol et obtenir des échantillons à différentes profondeurs.
- Spatule : Pour prélever de petits échantillons de sol, en particulier dans les horizons plus fins.
- Mètre ruban ou règle : Pour mesurer précisément les différentes couches du sol.
- Bac ou récipient : Pour stocker les échantillons de sol extraits pour les analyses en laboratoire.
- Carnet de terrain : Pour prendre des notes sur les observations et les caractéristiques des horizons.
- Appareil photo : Pour documenter visuellement le profil du sol et ses caractéristiques.

A.5.2.3 Creuser le profil pédologique

Une fois l'emplacement choisi, il faut creuser un trou ou une tranchée pour observer la disposition des horizons du sol en coupe. Voici les étapes pour creuser :

- Dimensions du trou : Creusez un trou d'une profondeur suffisante pour atteindre le substratum ou la couche mère du sol, généralement entre 1 mètre et 2 mètres de profondeur, selon la profondeur du sol. La largeur du trou doit être suffisante pour permettre une observation facile des horizons du sol.
- Retirer la couche superficielle : Enlevez d'abord la couche de surface (souvent riche en matière organique), puis continuez à creuser en sections de manière régulière pour exposer les différents horizons.
- Observer chaque horizon : À chaque profondeur, examinez et notez les propriétés de chaque horizon, comme la couleur, la texture (sable, limon, argile), la structure (granulaire, prismatique, lamellaire), la consistance (friable, dur, pâteuse), et l'odeur (s'il y a une décomposition notable).

A.5.2.4 Décrire les horizons du profil pédologique

Chaque horizon du sol doit être observé et décrit avec précision. La description doit inclure plusieurs caractéristiques importantes pour chaque horizon :

- Couleur : Utilisez une nuance de couleur ou un nuancier de Munsell pour caractériser la couleur du sol à chaque profondeur. La couleur peut indiquer la présence de certains minéraux, de matière organique ou de phénomènes comme l'hydromorphie (sols saturés en eau).
- Texture : Identifiez la texture du sol en fonction de la proportion de sable, limon et argile. Cela peut être fait par la méthode tactile ou en utilisant une analyse granulométrique en laboratoire.
- Structure : Décrivez la structure du sol (p. ex., granulaire, blocailleuse, prismatique, lamellaire, etc.). La structure peut influencer la perméabilité du sol et sa capacité à retenir l'eau et les nutriments.
- Consistance : Indiquez si le sol est dur, friable, pâteux, etc., ce qui donne des informations sur la facilité de pénétration des racines et sur la compaction du sol.
- Propriétés chimiques : Notez tout aspect chimique observable, comme la présence de salinité ou d'oxydes métalliques (fer, aluminium). Cela peut aussi inclure l'analyse du pH du sol et des éléments nutritifs si des tests chimiques sont réalisés.
- Présence de racines : Identifiez dans quel horizon se trouvent la majorité des racines et notez les types de végétation associés.
- Matière organique : Décrivez la quantité et l'état de la matière organique présente dans chaque horizon (par exemple, décomposée, fraîche, partiellement décomposée).

A.5.2.5 Échantillonnage et analyses en laboratoire

Pour compléter l'observation du profil, des échantillons de sol peuvent être prélevés à différentes profondeurs pour des analyses en laboratoire. Ces analyses permettent de mesurer la texture granulométrique, les caractéristiques chimiques (pH, teneur en nutriments, etc.), et les propriétés physiques (capacité de rétention d'eau, perméabilité).

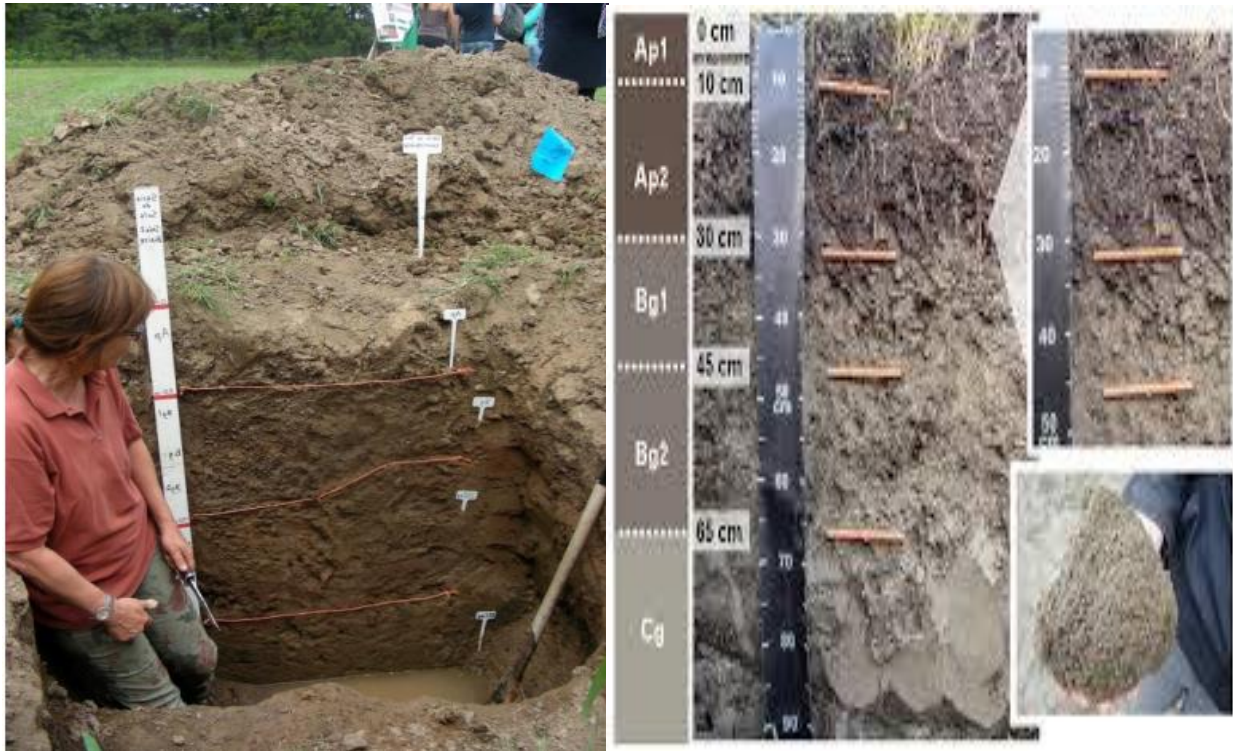


Figure 21. Réalisation d'un profil pédologique dans un sol

A.6. Couverture pédologique

Le terme couverture(s) pédologique(s) au singulier ou au pluriel est utilisé en pédologie pour désigner le sol ou les sols qui recouvrent plus ou moins en continu l'espace terrestre. Située entre l'écorce terrestre (partie supérieure de la lithosphère) et l'atmosphère, la couverture pédologique est en évolution constante (Boulet et al., 1985). Il s'agit d'une toposéquence sur piémont étendue.

D'une autre coté la **couverture pédologique** peut être définie comme l'ensemble des **unités de sol** qui recouvrent la surface terrestre d'une région donnée. Chaque unité est caractérisée par des propriétés pédologiques spécifiques, telles que la texture, la structure, la couleur, la profondeur, et la fertilité, et est influencée par des facteurs pédogénétiques qui modifient les sols au fil du temps. Elle varie d'un endroit à l'autre en fonction de la **génétique des sols**, des

facteurs environnementaux (climat, topographie, végétation), et des **activités humaines** (Baize & Jabiol, 1995).

A.6.1. Classification de la couverture pédologique

Les sols peuvent être classés de diverses manières en fonction de leurs caractéristiques, de leur origine, ou de leur utilisation. Plusieurs systèmes de classification des sols existent, et le plus utilisé au niveau mondial est le système de taxonomie des sols de l'USDA, qui regroupe les sols en groupes et sous-groupes en fonction de leurs propriétés principales. Voici une classification simplifiée des sols et de leur couverture (FAO, 1994) :

- Sols forestiers : Riches en matière organique, formés sous des forêts denses, souvent acides et bien drainés.
- Sols agricoles : Utilisés pour la culture des plantes, ils sont généralement amendés pour améliorer la fertilité, la structure et la rétention d'eau.
- Sols tropicaux : Comme les sols rouges ferrallitiques, qui sont typiques des climats tropicaux et subtropicaux, souvent acides et pauvres en nutriments.
- Sols désertiques : Prisés par des conditions arides, ils sont souvent sablonneux ou calcaires et ont une faible capacité de rétention d'eau.
- Sols hydromorphes : Comme les sols marécageux ou tourbeux, qui se forment dans des zones de forte humidité ou de stagnation de l'eau, souvent riches en matière organique mais pauvres en nutriments disponibles pour les plantes.

A.6.2. Cartographie de la couverture pédologique

La cartographie de la couverture pédologique consiste à créer des cartes détaillant la répartition des sols à la surface terrestre, en utilisant des outils de géoréférencement et des techniques de cartographie comme les systèmes d'information géographique (SIG). Les cartes pédologiques sont essentielles pour (Legros, 1996) :

- L'aménagement du territoire : Elles permettent d'identifier les zones adaptées à l'agriculture, la construction, ou la conservation des écosystèmes.
- La gestion des ressources naturelles : Une cartographie précise aide à comprendre la dynamique des sols, leur fertilité et leur capacité à soutenir certaines cultures ou à fournir des services écosystémiques.
- La protection de l'environnement : Elle permet de localiser les zones sensibles à l'érosion, à la salinisation ou à la pollution, et ainsi de prendre des mesures de gestion durable.

A.6.2.1 Méthodes pour réaliser une couverture pédologique

La création d'une couverture pédologique implique plusieurs étapes clés :

- Collecte de données sur le terrain : Cela comprend la collecte d'échantillons de sol à différentes profondeurs pour analyser leur texture, leur structure, leur couleur, leur composition chimique, et leur teneur en éléments nutritifs.
- Cartographie pédologique : En utilisant des outils de SIG et des photos aériennes, les cartographes définissent les zones de sol homogène, en fonction des données recueillies sur le terrain. Ces cartes peuvent être à grande échelle pour des études locales ou à plus petite échelle pour des zones étendues.
- Analyse des échantillons de sol : Les échantillons sont analysés en laboratoire pour obtenir des informations détaillées sur les propriétés chimiques et physiques des sols, telles que le pH, la texture, la structure, la conductivité électrique, et la capacité de rétention d'eau.
- Modélisation et interprétation des données : À l'aide des résultats de terrain et des analyses, les spécialistes modélisent la distribution des types de sols à une échelle régionale ou mondiale et interprètent les résultats pour des applications spécifiques comme l'agriculture, la gestion de l'eau, ou l'aménagement du territoire.

A.6.2.2 Importance de la couverture pédologique

La couverture pédologique joue un rôle crucial dans plusieurs domaines (Brady & Weil, 2008):

- Agriculture : Connaître la couverture pédologique permet d'optimiser l'utilisation des sols en fonction de leurs caractéristiques. Cela aide à choisir les cultures adaptées, à gérer la fertilisation et l'irrigation, et à éviter les problèmes tels que l'érosion ou la dégradation des sols.
- Gestion des risques environnementaux : La compréhension de la couverture pédologique aide à identifier les zones vulnérables à l'érosion, à la salinisation ou à la pollution, permettant ainsi de mettre en place des stratégies de conservation.
- Prévision climatique et gestion des ressources naturelles : L'étude de la couverture pédologique permet également d'identifier les sols sensibles aux changements climatiques et de gérer plus efficacement les ressources naturelles, telles que l'eau et la biodiversité.

A.7. La température du sol

La température du sol est une propriété pédologique importante qui influence de nombreux processus biologiques et chimiques au sein du sol. Elle joue un rôle crucial dans la croissance des plantes, la dégradation de la matière organique, et la dynamique de l'eau du sol. La température du sol varie selon la profondeur, la saison, la latitude, l'humidité, la couverture végétale et d'autres facteurs environnementaux. De nombreux facteurs peuvent influencer cette température sont classés en trois grandes catégories : les variables météorologiques, les conditions climatiques (notamment la température de l'air, l'ensoleillement et les précipitations),

- La profondeur du sol (les températures superficielles sont plus sujettes aux variations diurnes et saisonnières),
- Les propriétés physiques et chimiques du sol (par exemple, la capacité de rétention d'eau et la conductivité thermique),
- L'humidité du sol (les sols humides ont une capacité thermique différente de celle des sols secs). Variables du terrain et celles du sous-sol.

La variation de température à la surface du sol correspond à la température de l'air. Les recherches indiquent que l'amplitude diminue de façon exponentielle en fonction de l'éloignement de la surface (Fig. 28). Les températures du sol sont généralement constantes au cours de l'année pour des profondeurs supérieures à 5 et 6 m (Fig. 27). La température moyenne annuelle du sol est presque constante avec la profondeur ; elle augmente toutefois d'environ 1°C par 50 m à cause de la chaleur géothermique provenant du centre de la terre. La température a des variations quotidiennes se faisant sentir à une profondeur de pénétration d'environ 0.5 m sous la surface et les variations météorologiques, d'environ 1 m.

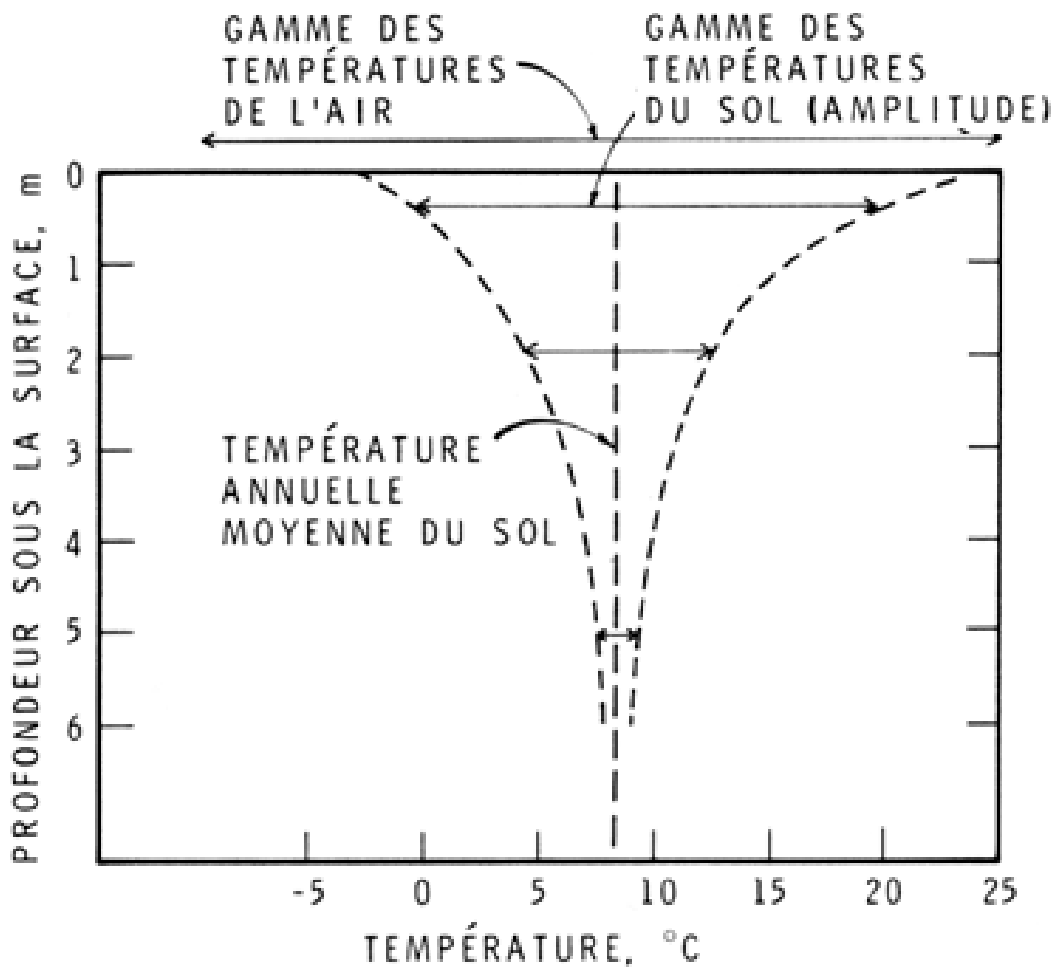


Figure 22. Exemple de la relation entre la profondeur et les températures annuelles du sol.

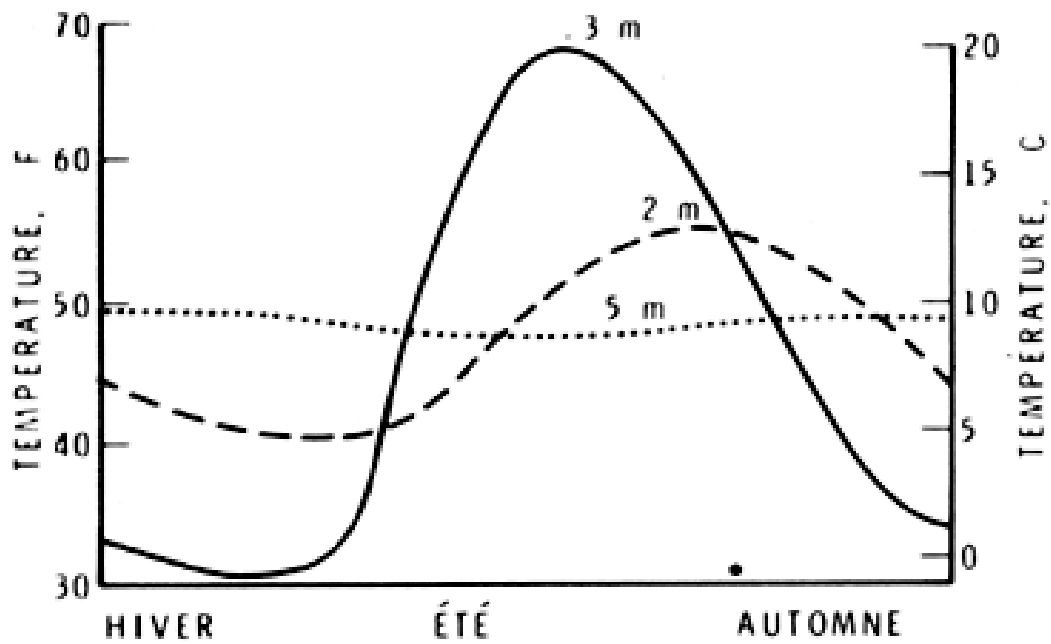


Figure 23. Variation annuelle des températures du sol.

A.7.1. Effets de la Température du Sol sur les Processus Pédologiques

La température du sol affecte une multitude de processus biologiques et chimiques :

Croissance des plantes : La température du sol influence directement la germination des graines, la croissance des racines et le développement des plantes. Les racines des plantes préfèrent des températures modérées, généralement entre 10°C et 30°C, selon les espèces. Des températures trop élevées ou trop basses peuvent limiter la capacité des racines à absorber de l'eau et des nutriments.

- Germination des graines : La germination des graines nécessite une température minimale qui varie en fonction de l'espèce. Des températures trop basses ou trop élevées retardent ou inhibent la germination.
- Croissance des racines : Les racines se développent mieux dans des conditions où la température du sol est modérée. Une température trop basse ralentit le métabolisme racinaire, et une température trop élevée peut entraîner un dessèchement rapide ou un stress thermique pour les racines.

Activité biologique du sol : La température du sol joue un rôle essentiel dans la dynamique des microorganismes du sol. Par exemple, les processus de décomposition de la matière organique par les micro-organismes sont plus rapides lorsque la température du sol est comprise entre 20°C et 30°C.

- Décomposition de la matière organique : La décomposition des résidus végétaux et des matières organiques se déroule plus efficacement à des températures modérées, favorisant ainsi le recyclage des nutriments dans le sol.
- Fixation de l'azote : Les bactéries fixatrices d'azote, essentielles pour la nutrition des plantes, sont sensibles à la température. Elles fonctionnent mieux dans des sols modérément chauds.

Changements chimiques : La température du sol affecte également la vitesse des réactions chimiques. Par exemple, des températures élevées peuvent accélérer l'oxydation du fer et de l'aluminium dans les sols, modifiant ainsi leur structure et leur fertilité.

- Solubilité des nutriments : Les nutriments comme le calcium, le magnésium et le potassium deviennent plus solubles à des températures modérées, rendant ces éléments plus disponibles pour les plantes.

- Réactions acido-basiques : Les réactions de neutralisation entre les acides et les bases dans le sol sont également influencées par la température.

Régulation de l'humidité du sol : La température du sol influence également l'évapotranspiration, c'est-à-dire le transfert d'eau du sol vers l'atmosphère par évaporation et transpiration des plantes. Un sol plus chaud augmente l'évaporation, ce qui peut entraîner un assèchement rapide du sol.

A.8. Propriétés chimiques et biologiques du sol

Les propriétés chimiques et biologiques des sols sont essentielles pour comprendre le fonctionnement des sols, leur fertilité, leur capacité à soutenir la vie végétale, ainsi que leurs interactions avec l'environnement. Ces propriétés influencent les processus pédogénétiques et la disponibilité des éléments nutritifs nécessaires aux plantes et aux organismes du sol.

Il s'agit essentiellement de propriétés colloïdales et électro-ioniques, concernant à la fois les fractions minérales et organiques du sol. Parmi ces propriétés, les principales sont : 1 les phénomènes d'échange des cations et des anions, 2 l'acidité, 3 le potentiel redox.

A.8.1. Propriétés chimiques du sol

Ils sont un ensemble de caractéristiques, en fonction de phénomènes chimiques ou physico-chimiques, en relation étroite avec le climat et surtout les organismes vivants, qui se combinent pour définir l'un des aspects de la fertilité d'un sol, affectant la virtualité productive des plantes cultivées.

Donc les propriétés chimiques du sol jouent un rôle crucial dans la fertilité, la gestion des nutriments, et la santé du sol. Elles influencent la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes, les processus biologiques, ainsi que les interactions entre les sols et l'environnement. Ces propriétés sont également essentielles pour comprendre la réactivité des sols aux pratiques agricoles, aux amendements et aux changements climatiques (Roose E. , 2018).

A.8.1.1 Le pH du sol

Le pH du sol mesure son acidité ou son alcalinité. Il est un indicateur clé de l'acidité des sols et affecte la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes (Brady & Weil, 2017).

- pH acide (< 7) : Typiquement observé dans les sols forestiers ou les zones tropicales humides. Les éléments nutritifs comme le fer, le manganèse et l'aluminium sont plus solubles et peuvent devenir toxiques.

- pH neutre (~7) : Idéal pour la plupart des plantes car la plupart des nutriments sont disponibles.
- pH alcalin (> 7) : Souvent observé dans les sols des régions arides ou désertiques. Des éléments comme le phosphore peuvent devenir moins disponibles.

Le rôle de pH : Le pH influence la solubilité et la disponibilité de nombreux nutriments essentiels comme le calcium (Ca), le magnésium (Mg), le phosphore (P), et le fer (Fe). Par exemple (Fig. 24) :

- Un pH acide peut rendre le phosphore moins disponible pour les plantes.
- Un pH alcalin peut entraîner une fixation du phosphore, le rendant difficilement accessible aux plantes.

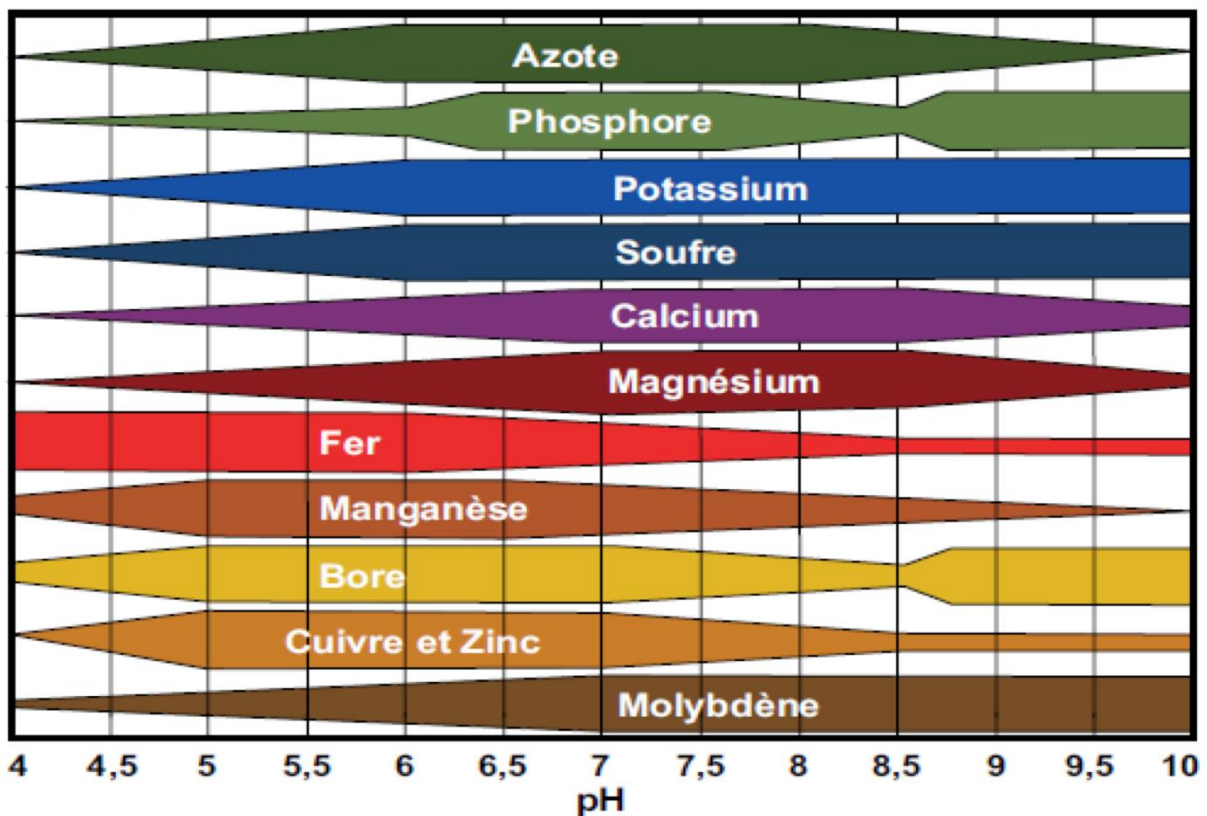


Figure 24. Impact de valeur de pH sur la disponibilité des éléments pour les plants

A.8.1.2 Capacité d'échange cationique (CEC)

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure de la capacité d'un sol à retenir et à échanger des ions positifs (cations). Les principaux cations dans le sol sont le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le potassium (K^+) et le sodium (Na^+).

La capacité d'échange de cations (CEC) est la quantité de cations échangeables, exprimée en milliéquivalents 100 grammes (MEq / 100 g), qu'un matériau ayant des propriétés d'adsorption peuvent retenir l'échange d'ions. L'échange d'ions est l'un des mécanismes les plus importants par lequel le sol conserve et met à disposition des plantes et les microorganismes d'éléments tels que le calcium, le magnésium, le potassium, l'azote ammoniacal, de sorte que le CSC est un indice de fertilité potentiel chimique terre (Julien, et al., 2023).

- Les sols argileux et ceux riches en matière organique ont une CEC élevée, ce qui leur permet de retenir davantage de nutriments.
- Les sols sableux ont une CEC faible, ce qui les rend plus vulnérables au lessivage des nutriments.
- La CEC dépend des propriétés des particules du sol (argiles, humus) qui ont des charges négatives et peuvent adsorber des cations.

Impact de la CEC : Une CEC élevée améliore la fertilité du sol en permettant de stocker et d'échanger les nutriments de manière efficace. Elle permet aussi de maintenir un équilibre ionique dans le sol.

Tableau 3. Importance et interprétation des valeurs de CEC des Sols

Valeur de la CEC en még/100g	Interprétation
CEC < 9	Petite capacité d'échange cationique
$9 \leq \text{CEC} \leq 12$	CEC moyenne
$12 < \text{CEC} \leq 15$	CEC assez élevé
$15 < \text{CEC} \leq 25$	CEC élevée
CEC > 25	CEC très élevée

A.8.1.3 Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) est un paramètre clé en pédologie qui permet de mesurer la concentration en ions dissous dans une solution de sol, généralement exprimée en dS/m (décisiemens par mètre). Ce paramètre est directement lié à la salinité du sol, c'est-à-dire à la quantité totale de sels solubles présents dans le sol. La CE permet donc d'évaluer l'intensité des échanges ioniques dans le sol et est utilisée pour diagnostiquer la fertilité du sol et les problèmes de salinité qui peuvent affecter la croissance des plantes (Jenny, 1980).

A.8.1.3.1 Principe de la Conductivité Électrique

La conductivité électrique (CE) mesure la capacité d'un sol à conduire un courant électrique, ce qui est directement influencé par la concentration d'ions dissous dans le sol. Ces ions proviennent des sels solubles présents dans la solution du sol. Plus un sol contient d'ions dissous, plus sa capacité à conduire un courant sera élevée, ce qui se traduit par une valeur de CE plus élevée. Cette conductivité est mesurée dans une solution de filtrats du sol ou dans une suspension sol-eau (1:1, 1:2, ou 1/5 selon les normes).

Types de sol et leur CE : On reconcentre différents types de sol selon leur CE comme suite

- Sols non salins : Leur CE sera faible (environ 0.1 à 0.2 dS/m), indiquant peu ou pas de sels solubles.
- Sols salins : sont des sols avec une CE plus élevée (au-dessus de 2 dS/m) sont typiquement affectés par une concentration élevée de sels.
- Sols sodiques : Ils présentent souvent une CE plus faible, mais une concentration élevée en sodium (Na^+), ce qui peut rendre le sol toxique pour les plantes, même s'il semble relativement pauvre en sels.

A.8.1.3.2 Interprétation de la Conductivité Électrique (CE)

La CE du sol est utilisée pour évaluer les niveaux de salinité, et sa valeur est souvent interprétée comme suit. Donc conductivité électrique (CE) des sols détermine leur degré de salinité. Cette salinité se traduit par un comportement différent des cultures vis-à-vis des classes de salinité. L'échelle de Durand J.H. (1983) a été utilisée pour indiquer la classe de salinité des sols sur extrait 1/5 et l'effet sur le rendement des cultures (Tableau 4).

Tableau 4. Interprétation es valeurs de la salinité (CE) des sols

Classe	CE en $\mu\text{s}/\text{cm}$ à 25 °C	Qualité des sols	Effet sur le rendement
Classe I	0 à 500	Non salé	Négligeable
Classe II	500 à 1000	Légèrement salé	Diminution du rendement des cultures très sensibles au sel
Classe III	1000 à 2000	Salé	Diminution des rendements de la plus part des cultures
Classe IV	2000 à 4000	Très salé	Seules les cultures résistantes donnent un rendement satisfaisant
Classe V	Plus de 4000	Extrêmement salé	Seules quelques cultures donnent des rendements satisfaisants

A.8.1.3.3 Impact sur les plantes

Les plantes sont généralement sensibles aux concentrations de sels dissous. Une CE élevée indique une forte concentration de sels solubles, ce qui peut perturber l'absorption d'eau par les racines via le phénomène d'osmose.

Une salinité excessive ($CE > 4 \text{ dS/m}$) peut entraîner une toxicité des sels (comme le chlorure de sodium), une réduction de la croissance des racines, et diminuer la disponibilité des nutriments essentiels. Les zones arides et semi-arides connaissent souvent des problèmes de salinisation en raison de l'évaporation qui laisse les sels se concentrer à la surface du sol.

A.8.1.3.4 Mesure de la CE dans le sol

Pour mesurer la CE du sol, plusieurs méthodes sont utilisées (Corwin & Yemoto, 2017) :

- Test de la solution de sol : Un échantillon de sol est mélangé avec de l'eau déminéralisée dans un rapport standard (souvent 1:10 ou 1:5), puis la conductivité est mesurée avec un conductimètre. La CE mesurée est liée à la concentration des ions dissous dans la solution extraite.
- Méthode de la sonde de terrain : Une sonde conductimétrique est insérée directement dans le sol pour obtenir une mesure instantanée de la salinité.

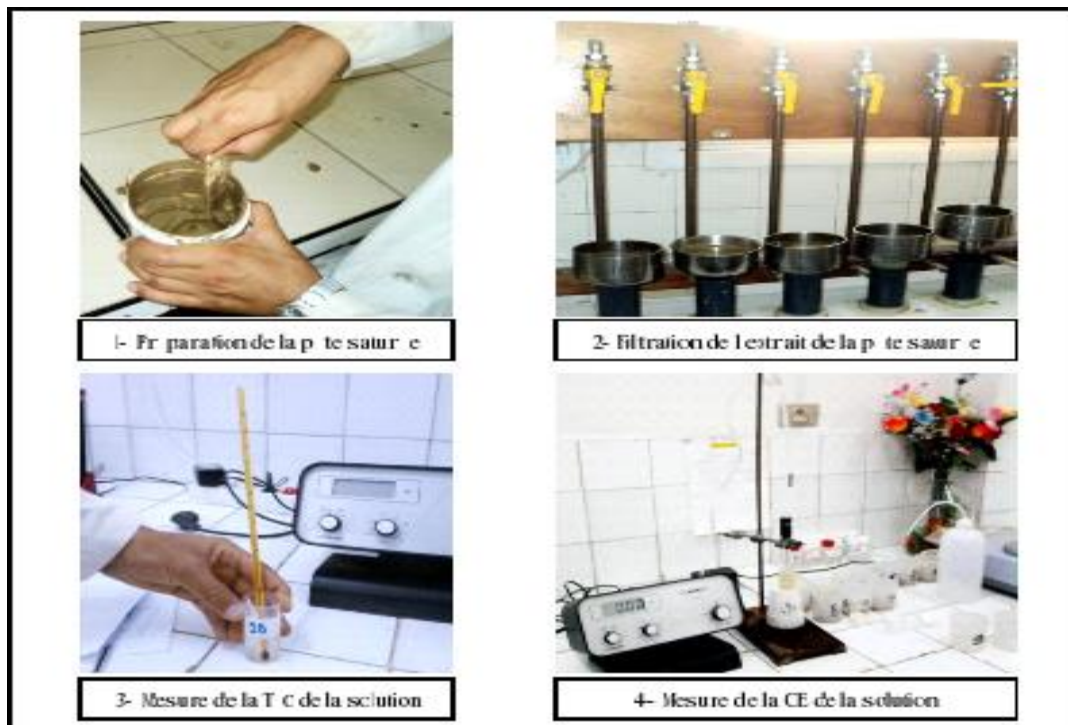


Figure 25. Mesure de la salinité des sols (CE) en laboratoire par la méthode magnétique

A.8.1.3.5 Facteurs influençant la CE

Les facteurs suivants influencent la conductivité électrique du sol (Vargas, Pankova, Balyuk, & Krasiln, 2018) :

- Concentration en sels solubles : La salinité est déterminée par la concentration des ions dissous, tels que les cations (Na^+ , Ca^{2+} , K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-). Lorsque ces sels sont dissous dans l'eau du sol, la CE augmente proportionnellement.
- Nature des sels : Les sels solubles ont des effets différents selon leur nature chimique. Par exemple, les sels de sodium peuvent rendre le sol plus compact et moins perméable à l'eau, en plus de réduire la capacité des plantes à absorber l'eau.
- Humidité du sol : Les sols humides conduisent mieux l'électricité que les sols secs. Par conséquent, les mesures de CE peuvent être influencées par le taux d'humidité au moment de la prise de l'échantillon.
- Type de sol : Les sols argileux et limoneux ont souvent une CEC plus élevée, ce qui permet de retenir plus de cations et donc d'affecter la salinité d'une manière différente des sols sableux. Les sols sableux ont généralement une CE plus faible à moins qu'ils ne soient fortement salinisés.

- Température : La température peut affecter la conductivité des solutions du sol. En règle générale, à mesure que la température augmente, la conductivité électrique augmente également, car la mobilité des ions est plus élevée.
- pH du sol : Le pH peut affecter la solubilité des sels et donc la conductivité électrique. Par exemple, dans un sol acide, les sels de fer et de manganèse peuvent se dissoudre davantage, augmentant la CE.

A.8.1.3.6 Implications de la CE pour la gestion du sol

Salinisation des sols : Un des problèmes majeurs en agriculture est la salinisation, qui se produit souvent à cause de pratiques agricoles inappropriées, de l'irrigation excessive, ou de la montée des nappes phréatiques salines. Une CE élevée peut entraîner des réductions de rendement des cultures (Schofield & Taylor, 1955).

Agriculture et irrigation : Il est essentiel de connaître la CE avant d'appliquer des pratiques d'irrigation, surtout dans les régions où l'irrigation peut induire une accumulation de sels. Les sols avec une CE élevée peuvent nécessiter des traitements tels que l'addition de matière organique ou l'utilisation de cultures tolérantes à la salinité (Corwin & Lesch, 20003).

Surveillance de la salinité : La surveillance de la CE est utilisée pour évaluer la salinité et prendre des décisions agricoles adaptées, comme l'irrigation avec de l'eau douce ou la gestion des apports de sulfates ou de chlorures.

A.8.1.4 Sols et éléments nutritifs

Les éléments nutritifs essentiels pour les plantes incluent des macronutriments (azote, phosphore, potassium, calcium, magnésium, soufre) et des micronutriments (fer, manganèse, zinc, cuivre, molybdène). Les propriétés chimiques du sol, telles que la CEC et le pH, affectent leur disponibilité dans le sol (Unifa, 2017).

- Azote (N) : L'azote est essentiel pour la formation de la chlorophylle et des protéines et surtout la croissance végétale. Dans le sol, il existe sous différentes formes : azote ammoniacal (NH_4^+), nitrate (NO_3^-) et azote organique. La nitrification (conversion de NH_4^+ en NO_3^- par les bactéries) est influencée par la température et le pH.
- Phosphore (P) : Le phosphore est crucial pour la photosynthèse et la maturation des fruits et graines. Dans le sol, il est souvent lié à des minerais insolubles et peut être difficilement accessible aux plantes, surtout dans les sols à pH acide ou alcalin.

- Potassium (K) : Le potassium est impliqué dans la régulation de l'eau et des enzymes. Il est facilement disponible dans le sol, sauf si la salinité est élevée il va être bloquer.

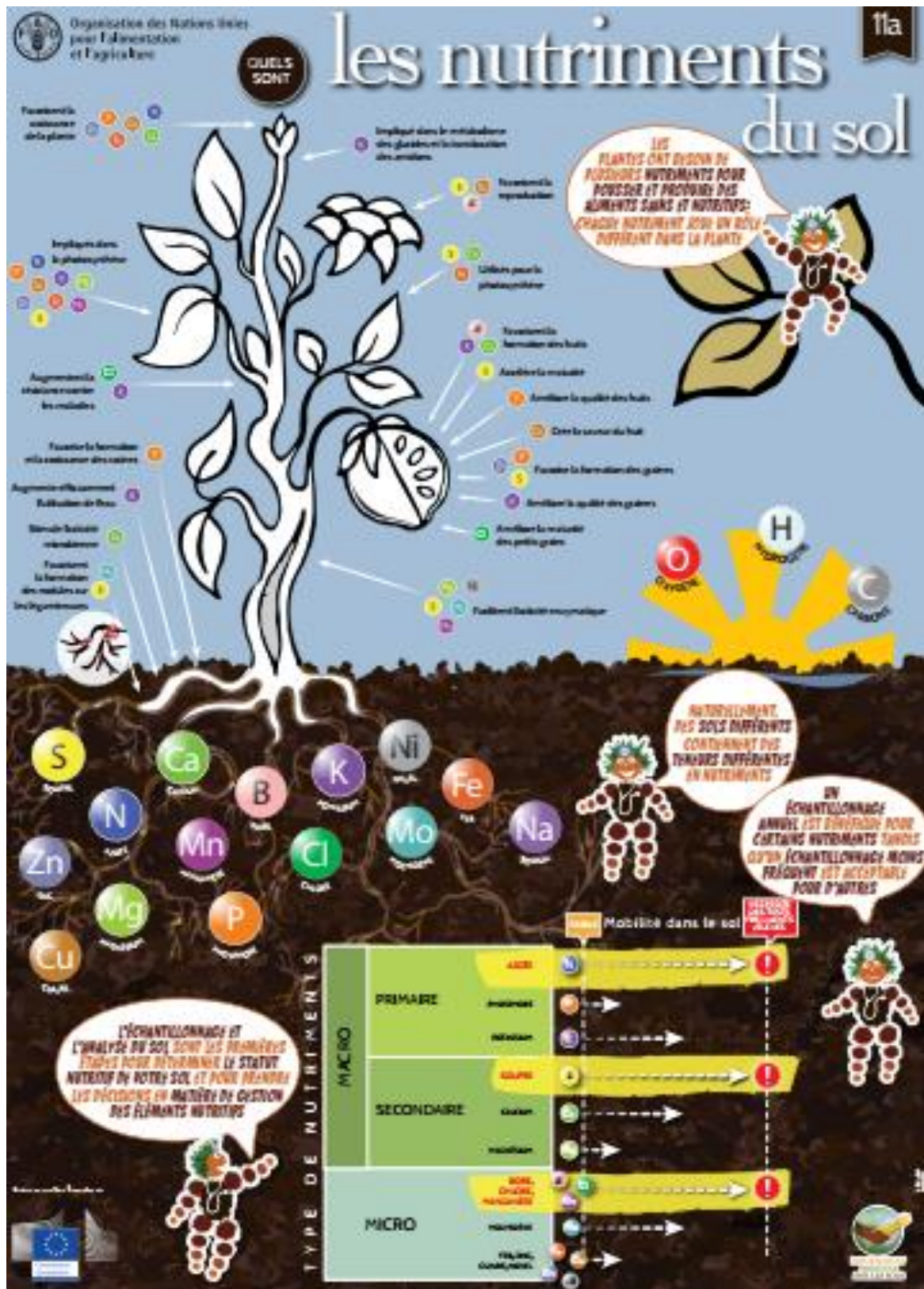


Figure 26. Schéma présentatif de nutriments du sol pour une bonne croissance des plantes

A.8.1.5 Le Calcaire du Sol

Le dosage du calcaire dans le sol est une mesure importante qui permet de comprendre l'équilibre chimique et la réaction acido-basique du sol. Le calcaire, sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3) ou d'autres formes similaires, joue un rôle crucial dans la gestion de l'acidité (Alcalinité) du sol et dans la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Le calcaire est souvent ajouté au sol sous forme de chaux agricole pour améliorer la fertilité du sol et neutraliser l'acidité (Reid, et al., 2006).

A.8.1.5.1 Rôle du Calcaire dans le Sol

Le calcaire a plusieurs fonctions essentielles dans le sol (Bryssine, 1986) :

- Neutralisation de l'acidité du sol : L'une des fonctions principales du calcaire est la neutralisation de l'acidité du sol. L'acidité excessive ($\text{pH} < 7$) peut rendre les éléments nutritifs moins disponibles pour les plantes et favoriser la toxicité de certains éléments comme l'aluminium (Al). Lorsque du calcaire est ajouté au sol, il réagit avec les ions d'hydrogène (H^+) dans le sol pour augmenter le pH et créer des conditions plus favorables à la croissance des plantes. La réaction chimique se produit comme suit : $\text{CaCO}_3 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Cette neutralisation est particulièrement importante pour les sols acides, comme ceux des régions tropicales ou certains sols de montagne.
- Amélioration de la disponibilité des nutriments : Un sol plus neutre (pH proche de 6,5 à 7) permet une meilleure disponibilité des nutriments essentiels tels que phosphore (P), calcium (Ca), magnésium (Mg), et potassium (K). Dans des conditions acides, le phosphore peut devenir moins disponible, et d'autres nutriments peuvent être fixés par des minéraux du sol.
- Amélioration de la structure du sol : Le calcaire peut également améliorer la structure physique du sol, en particulier dans les sols argileux lourds. L'ajout de chaux peut réduire la compaction du sol et améliorer la porosité, ce qui permet une meilleure aération et infiltration de l'eau. Cela favorise également la croissance des racines et l'activité biologique dans le sol.
- Réduction de la toxicité de l'aluminium : Dans les sols acides, le calcium du calcaire peut neutraliser l'aluminium (Al^{3+}), un ion toxique pour les racines des plantes. En diminuant la concentration d'aluminium soluble, le calcaire réduit la toxicité de l'aluminium, ce qui est particulièrement important pour les cultures dans les sols acides.

A.8.1.5.2 Méthodes de Dosage du Calcaire

Le dosage du calcaire dans le sol est effectué pour déterminer la quantité nécessaire pour corriger l'acidité du sol et améliorer ses propriétés physiques et chimiques. Cela implique généralement les étapes suivantes (Aubert, Ollat, & Pinta, 1954) :

- **Mesure du pH du sol** : Le pH du sol est l'indicateur principal pour savoir si un sol est acide ou alcalin. Le dosage du calcaire dépend directement du pH mesuré dans le sol. Les sols avec un pH inférieur à 5,5 nécessitent généralement l'ajout de calcaire pour atteindre un pH neutre.
- **Évaluation du pouvoir tampon du sol** : Le pouvoir tampon d'un sol mesure sa capacité à résister aux changements de pH. Plus un sol a un pouvoir tampon élevé, plus il est difficile d'en changer le pH. Ce pouvoir tampon est influencé par la texture du sol et sa teneur en matière organique. Les sols argileux et ceux riches en humus ont souvent un pouvoir tampon plus élevé.
- **Quantité de calcaire à ajouter** : La quantité de chaux agricole (calcaire) à ajouter dépend du pH actuel du sol, du pH souhaité, de la surface du sol à traiter, ainsi que du type de calcaire utilisé. Pour déterminer la quantité exacte, un calcul basé sur le pouvoir tampon du sol et les recommandations agricoles locales est utilisé.
- **Types de calcaire utilisés** : Il existe différents types de calcaire, dont le calcaire dolomitique (qui contient du magnésium) et le calcaire calcique. Le choix entre ces types de calcaire dépend de la carence en magnésium dans le sol, car le calcaire dolomitique peut également ajouter du magnésium, un nutriment essentiel.
- **Tests de sol réguliers** : Des tests de sol réguliers permettent d'évaluer l'efficacité de l'ajout de calcaire et d'ajuster la gestion de l'acidité en conséquence. Ces tests mesurent non seulement le pH, mais aussi la CEC (capacité d'échange cationique), qui peut influencer la réaction du sol au calcaire.

A.8.1.5.3 Impact de calcaire sur les Cultures et l'Agriculture

L'impact de calcaire dans l'agriculture peut être résumé en différents cas (Robson, 1989):

- **Amélioration des rendements agricoles** : Le dosage adéquat de calcaire dans le sol peut améliorer de manière significative les rendements des cultures, surtout dans les zones où les sols sont naturellement acides. Par exemple, des sols acides peuvent limiter la croissance des cultures de blé, de maïs, ou de légumineuses. En apportant du calcaire, on crée des conditions favorables à leur croissance .

- Pratiques agricoles durables : L'utilisation de calcaire dans le cadre d'une gestion intégrée du sol permet de maintenir la santé du sol et d'assurer sa fertilité à long terme. Cela fait partie des pratiques agricoles durables qui visent à minimiser l'impact environnemental tout en maximisant la productivité agricole.
- Gestion de la salinité : Dans certains cas, l'ajout de calcaire peut aider à gérer les sols salins, en réduisant les effets négatifs de l'acidité sur les racines des plantes et en améliorant les conditions d'absorption d'eau.

A.8.2. Le complexe adsorbant

Le complexe adsorbant du sol désigne l'ensemble des minéraux, matières organiques et ions qui sont adsorbés (ou attachés) à la surface des particules solides du sol, notamment les minéraux argileux et la matière organique. Cette adsorption est un processus fondamental qui affecte les propriétés chimiques et biologiques du sol, notamment la réactivité chimique, la disponibilité des nutriments pour les plantes et l'activité microbienne (Archambeaud & Thomas, 2023).

Le complexe adsorbant est essentiellement un réservoir d'ions qui influence le pH du sol, la salinité, la fertilité et l'interactions ioniques dans le sol. Il est responsable de l'adsorption et de la libération de cations et d'anions, un processus essentiel pour la gestion des éléments nutritifs et des polluants dans les sols (Calvet, Chenu, & Houot, 2011).

A.8.2.1 Composants du Complexe Adsorbant

Le complexe adsorbant du sol est principalement constitué des éléments suivants :

Argiles et Minéraux de Surface

Les particules argileuses sont les principaux sites d'adsorption dans le sol. En raison de leur surface spécifique élevée et de leur charge négative, elles peuvent retenir une grande quantité de cations (ions positifs). Les principaux types d'argiles impliquées dans le complexe adsorbant sont : Kaolinite, Illite, et Montmorillonite (argile smectique)

Les argiles smectiques, comme la montmorillonite, ont une capacité d'échange cationique (CEC) plus élevée que d'autres types d'argile, ce qui leur permet d'adsorber plus d'ions.

Matière Organique

La matière organique joue un rôle clé dans la charge négative du complexe adsorbant, et elle est particulièrement importante dans les sols riches en humus. L'humus, la forme décomposée

de la matière organique, a une charge négative importante et une surface spécifique élevée, capable d'adsorber des cations, des anions, et des molécules organiques.

Cations et Anions

Le complexe adsorbant contient des cations échangeables (tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et des anions échangeables (tels que SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-). Ces ions sont adsorbés par les surfaces des particules du sol et peuvent être échangés avec les ions présents dans la solution du sol selon le principe de l'échange ionique.

Les cations sont généralement adsorbés par la charge négative des argiles et de la matière organique.

Les anions sont également adsorbés, mais dans une moindre mesure, car les particules du sol ont une charge majoritairement négative et n'attirent pas les anions aussi fortement que les cations.

A.8.2.2 Échange Ionique et Mécanismes

L'échange ionique est le processus par lequel des ions adsorbés (souvent cations) sont remplacés par des ions dissous dans la solution du sol. Par exemple, les cations Ca^{2+} peuvent être échangés avec des cations H^+ provenant de l'acidité du sol. Ce processus influence directement la disponibilité des nutriments pour les plantes. Les mécanismes d'échange ionique comprennent :

- L'adsorption physique : Les ions sont attirés par les surfaces chargées des particules du sol.
- L'adsorption chimique : Les ions sont fixés par des liaisons chimiques sur les surfaces du sol.

A.8.2.3 Impact sur la Fertilité du Sol et les Cultures

Le complexe adsorbant du sol est crucial pour la gestion de la fertilité du sol :

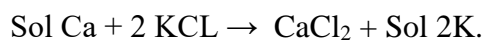
- Il régule la disponibilité des nutriments en influençant les concentrations d'ions dans la solution du sol.
- Un sol avec une CEC élevée peut mieux retenir les nutriments (comme Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+}) et les protéger contre le lessivage.
- L'adsorption et l'échange des ions Na^+ , K^+ , et Ca^{2+} affectent directement la nutrition des plantes, le pH du sol, et la structure du sol.

- Fertilité : Les sols avec une CEC élevée sont plus fertiles, car ils peuvent retenir une plus grande quantité de cations nutritifs. Les sols avec une CEC faible, souvent sableux, ne retiennent pas bien les nutriments et peuvent nécessiter des apports réguliers d'engrais.
- Toxicité : Le complexe adsorbant peut également jouer un rôle dans l'accumulation des toxines, comme les ions Al^{3+} dans les sols acides. Dans ces sols, les cations Ca^{2+} peuvent remplacer les ions Al^{3+} sur les sites d'adsorption, réduisant ainsi leur toxicité pour les racines des plantes.

De ce fait, par ses propriétés d'échange un sol est capable soit de prélever des ions aux solutions qui sont à son contact, soit de leur en fournir. Le complexe adsorbant est donc l'ensemble des colloïdes (composés humiques et argiles minéralogiques), doté de charges négatives susceptibles de retenir les cations sous forme échangeable.

Les ions échangeables du complexe adsorbant sont en équilibre avec les solutions du sol : toute modification de la composition de la solution du sol provoque un changement de cet équilibre par « échange » : certains ions du complexe passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions, en solution (adsorption).

Exemple d'un phénomène d'échange : apport d'un engrais potassique dans un sol à complexe saturé d'ion Ca^{2+} :



K^+ remplace Ca^{++} dans le complexe, alors que Ca^{++} passe en solution.

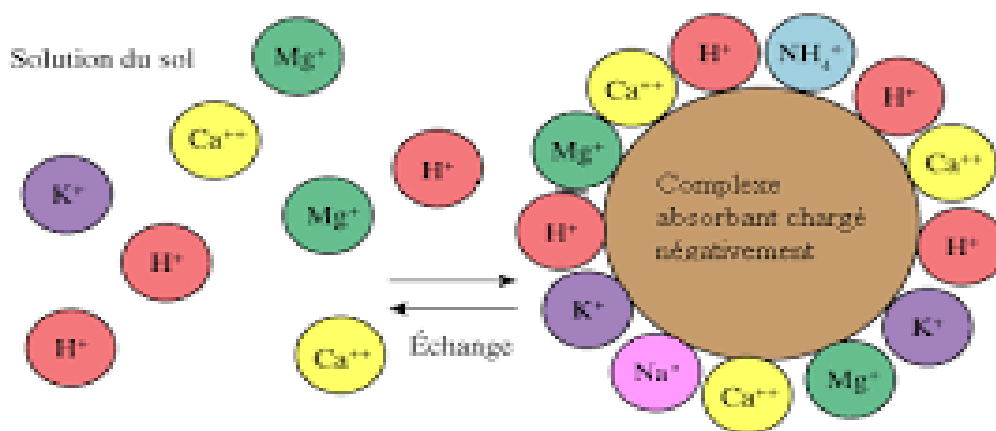
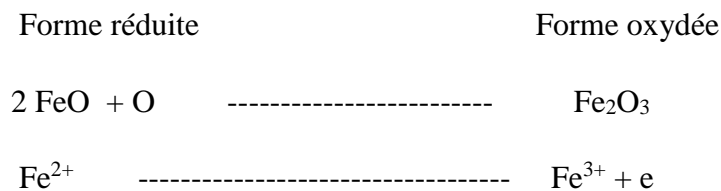


Figure 27. Exemple schématique d'un complexe adsorbant du sol et échange ioniques

A.8.3. Le potentiel d'oxydo-réduction

L'un des paramètres les plus utilisés pour rendre compte des propriétés oxydantes ou réductrices du milieu sol est le potentiel d'oxydo-réduction. En effet ; le potentiel d'oxydo-réduction (souvent abrégé en Eh) du sol qui mesure de la capacité du sol à accepter ou à donner des électrons dans des processus chimiques. Il reflète l'activité redox du sol, c'est-à-dire les réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent entre les ions et les composés présents dans la solution du sol. Ces réactions sont cruciales pour les cycles biogéochimiques et affectent directement les processus de dégradation organique, la disponibilité des nutriments pour les plantes et la toxicité des éléments comme le fer, manganèse, soufre, et azote (Tano, et al., 2020) (Fig. 28).

Exemple



Le redox et les bio-agresseurs

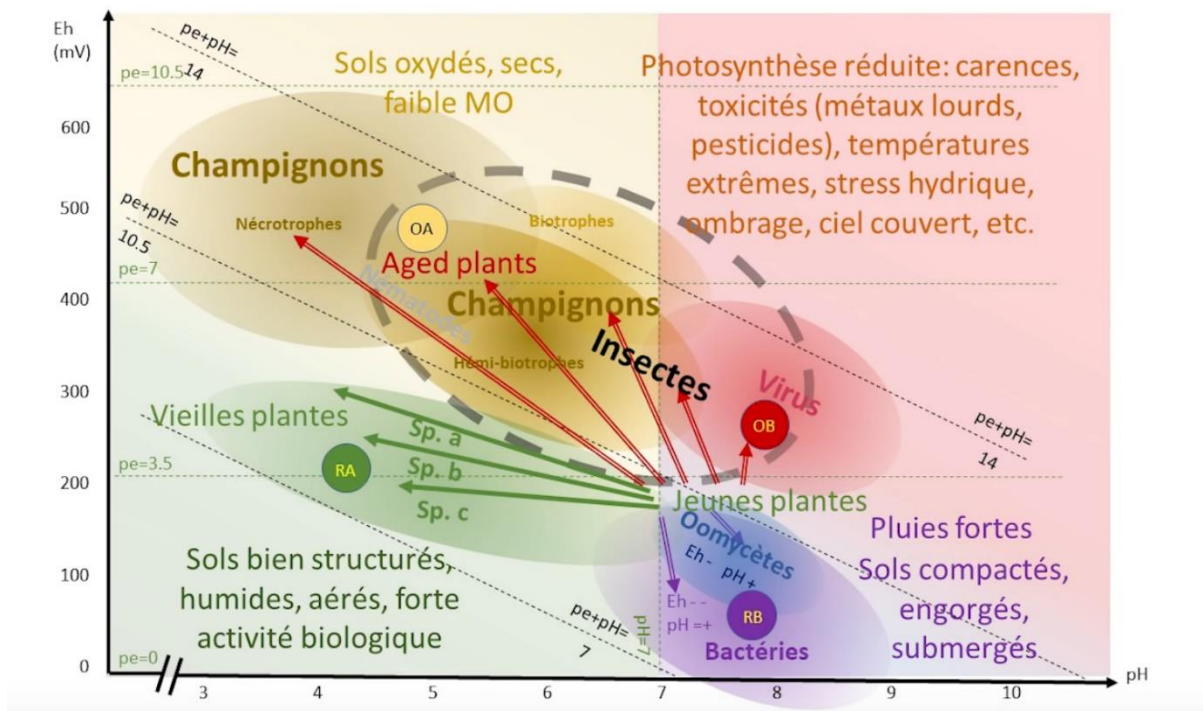


Figure 28. Variation de potentiel redox du sol et sont influences sur différents organisme

A.8.3.1 Principe de Base du Potentiel d'Oxydo-Réduction (Eh)

Le potentiel d'oxydo-réduction est mesuré en millivolts (mV) et indique si un environnement est plutôt réducteur ou oxydant (Abirami, Jothimani, & Leninraja, 2023):

- Un potentiel Eh élevé (> 300 mV) indique un environnement oxydant, où les espèces réductrices (qui acceptent des électrons) sont plus susceptibles de se transformer en espèces oxydées.
- Un potentiel Eh faible (< 0 mV) indique un environnement réducteur, où les espèces oxydées (qui perdent des électrons) ont tendance à être réduites.
- Le potentiel Eh est directement lié à la concentration des ions et des gaz dissous dans le sol, comme l'oxygène dissous (O_2), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), et l'hydrogène (H_2).

A.8.3.2 Les facteurs influencent Eh

Le Eh varie, pour l'ensemble des sols terrestres, entre 900 mV (conditions oxydantes) et -300 mV (conditions très réductrices). Il dépend de plusieurs facteurs (Nawaz, Bourrié, & Gul, 2014) :

- Concentration et humidité : Le potentiel d'oxydo-réduction d'un système dépend à la fois de la concentration globale de l'élément actif (ex le Eh augmente quand [Fer] augmente) et du rapport des éléments (ex si $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 100$, $Eh = 890$ mV et si $Fe^{3+}/Fe^{2+} = 1/10$, $Eh = 650$ mV). Les variations d'humidité du sol créent des variations de concentration en éléments du système redox mais surtout, provoquent une réorganisation de la microflore du sol qui aboutit à des niveaux de Eh très différents.
- Le pH : L'addition d'ions H^+ dans un système redox abaisse le Eh du système.
- Présence de substances organiques : L'introduction de matières organiques dans le système sol abaisse le potentiel redox.
- Rôle de la microflore : De nombreux chercheurs ont montré l'importance de la microflore dans le processus d'oxydo-réduction en conditions aérobies ou anaérobies. Si le sol est hydromorphe et qu'il renferme des substrats métabolisables, la microflore consomme d'abord l'oxygène du sol puis réduit Mn^{3+} en Mn^{2+} , puis Fe^{3+} en Fe^{2+} , le Eh s'abaisse et ceci d'autant plus rapidement qu'il y a plus de substances carbonées énergétiques dans le milieu.

A.8.3.3 L'influence de l'aération et le niveau d'oxydo-réduction sur l'évolution des sols

L'état d'aération et le niveau d'oxydo-réduction règlent un grand nombre d'équilibres physicochimiques et biochimiques de grande importance dans le sol.

- Pédogenèse des milieux riches en oxygène : Le Eh est élevé, l'oxygène est fourni aux organismes en abondance, soit sous forme gazeuse, soit sous forme dissoute dans les eaux froides et renouvelées. La biodégradation de la matière organique est active : la tendance est à la brunification.
- Pédogenèse en milieu déficient en oxygène semi-anaérobie : Il s'agit soit d'hydromorphie temporaire (par les eaux stagnantes), soit d'une imbibition par l'eau de certains milieux spongieux. Si le milieu est en outre acide, l'activité biologique minéralisatrice devient faible ; les composés organiques solubles ont tendance à s'accumuler, en même temps le fer réduit au moins partiellement et susceptible de migrer dans le profil (podzols, pseudogleys acides).
- Pédogenèse en milieu fortement réducteur : Il s'agit de l'hydromorphie provoquée par les eaux stagnantes formant des nappes permanentes, susceptibles de s'échauffer. Il s'installe alors une anaérobiose accentuée et presque constante. L'activité microbiologique est insuffisante, la matière organique fraîche insoluble et les composés organiques solubles s'accumulent dans l'humus en période hivernale, ce qui abaisse progressivement le Eh (cas des tourbes). Dans ces milieux très réducteurs, les sulfates étant réduits en sulfures, ils s'accumulent des sulfures de fer noirâtres (gleys noirs).

A.8.3.4 Conséquences du Potentiel d'Oxydo-Réduction sur la Disponibilité des Nutriments

Le Eh du sol affecte directement la disponibilité des nutriments pour les plantes en influençant leur forme chimique et leur solubilité (Tokarz & Urban, 2015):

- Fer (Fe) : Sous des conditions réductrices, le fer est réduit de sa forme Fe^{3+} (non disponible pour les plantes) à Fe^{2+} (disponible pour les plantes). Dans des conditions oxydantes, le Fe^{2+} se transforme en Fe^{3+} , rendant le fer moins disponible pour les plantes.
- Manganèse (Mn) : Le manganèse est également affecté par le Eh. Sous un potentiel Eh faible (réducteur), le Mn^{2+} est disponible, tandis que dans un environnement oxydant, le manganèse se précipite sous forme de MnO_2 , réduisant sa disponibilité.

- Soufre (S) : Le soufre est présent sous la forme de sulfates (SO_4^{2-}) dans un sol oxydant et se réduit en sulfure (S^{2-}) dans un sol réducteur. La forme réduite du soufre peut être toxique pour les plantes à des concentrations élevées, mais elle est également plus facilement utilisée par certaines espèces de plantes.
- Azote (N) : Dans les sols saturés en eau, les bactéries dénitrifiantes peuvent réduire les nitrates (NO_3^-) en azote gazeux (N_2), ce qui entraîne une perte d'azote disponible pour les plantes. Cette réduction dépend du Eh et de la disponibilité en oxygène.
- Phosphore (P) : Le phosphore est souvent moins disponible dans les sols réducteurs, car il peut se fixer sous forme de phosphates de fer ou de manganèse dans des conditions réductrices.



B. L'eau

B.1. Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau, également appelé le cycle hydrologique, désigne l'ensemble des processus naturels qui permettent à l'eau de se déplacer, se transformer et circuler entre les différents réservoirs d'eau de la Terre, à savoir l'atmosphère, les océans, les rivières, les lacs, les sols, et les nappes phréatiques. Ce cycle est crucial pour maintenir l'équilibre hydrique sur Terre et a des impacts directs sur l'agriculture, les écosystèmes, et le climat (Jeandel & Mosseri, 2017).

Le cycle de l'eau repose sur plusieurs processus interconnectés, chacun jouant un rôle essentiel dans le transfert de l'eau d'un réservoir à un autre. Ces processus sont essentiellement l'évaporation, la transpiration, la précipitation, l'infiltration, et le ruissellement.

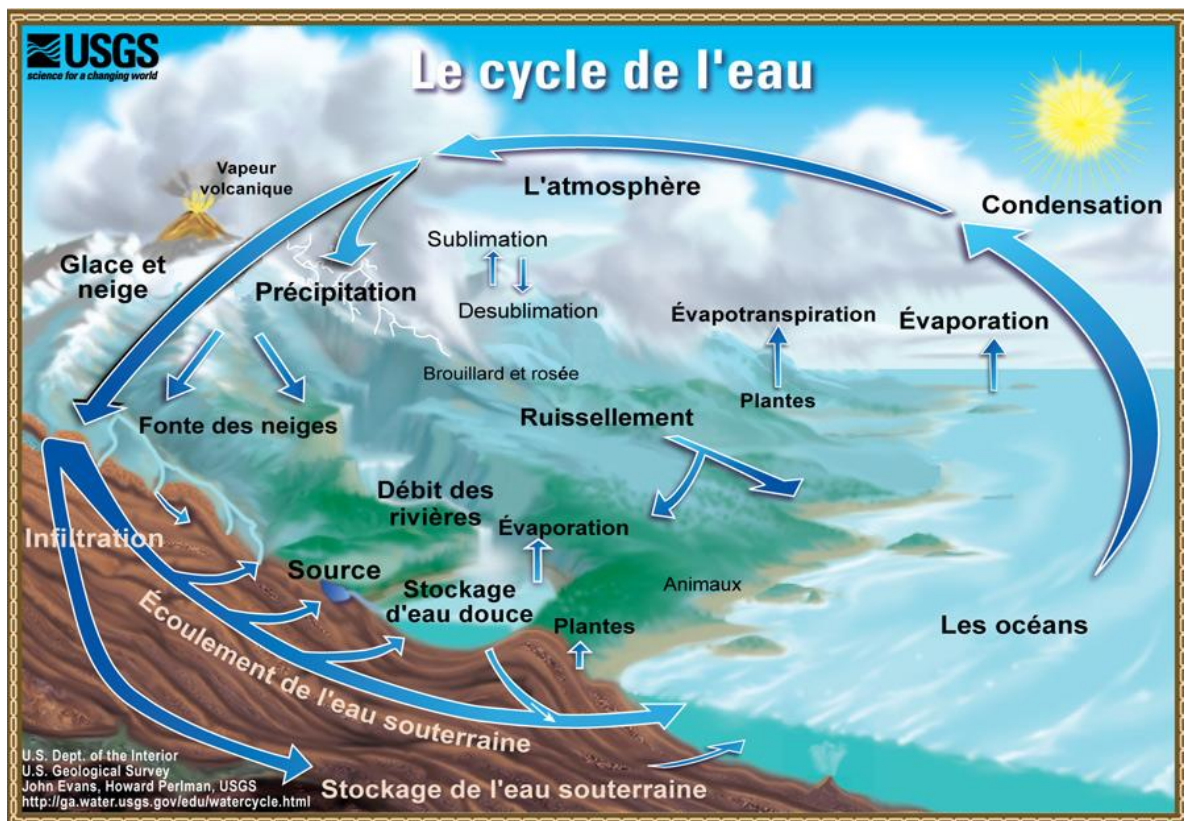


Figure 29. Schéma présentatif de cycle de l'eau

B.1.1. Les Composantes du Cycle de l'Eau

B.1.1.1 L'Évaporation

L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide se transforme en vapeur d'eau sous l'effet de la chaleur provenant du soleil. Ce phénomène se produit principalement à la surface des

océans, des lacs, et des rivières. En effet, environ 85% de l'évaporation globale provient des océans et des grandes masses d'eau. Ce processus joue un rôle crucial dans le transfert d'humidité vers l'atmosphère (Oki & Kanae, 2006).

B.1.1.2 La Transpiration

La transpiration désigne la libération de vapeur d'eau par les plantes à travers les stomates de leurs feuilles. Elle est un processus physiologique clé pour les plantes, en particulier dans leur interaction avec l'eau du sol. La transpiration permet aux plantes de réguler leur température et d'absorber des nutriments dissous dans l'eau. Ensemble, l'évaporation et la transpiration forment ce que l'on appelle l'évapotranspiration.

B.1.1.3 La Précipitation

La précipitation est l'eau qui retombe sur la Terre sous forme de pluie, neige, grêle, ou bruine. Elle se forme lorsque la vapeur d'eau dans l'atmosphère se condense et se refroidit, formant des nuages. Lorsque ces nuages deviennent trop saturés, l'eau tombe sur le sol. La précipitation représente une des principales façons dont l'eau est transférée de l'atmosphère vers la surface terrestre.

B.1.1.4 L'Infiltration

L'infiltration est le processus par lequel l'eau de pluie ou de neige fondue pénètre dans le sol. La vitesse à laquelle l'eau s'infiltré dépend de la texture du sol, de sa structure et de son taux d'humidité initial. L'eau infiltrée peut être stockée dans le sol ou se déplacer vers des nappes phréatiques pour constituer une réserve d'eau souterraine.

B.1.1.5 Le Ruissellement

Le ruissellement se produit lorsque l'eau de pluie ne peut pas s'infiltrer dans le sol (en raison de la saturation du sol ou de sa texture imperméable). Elle s'écoule alors à la surface du sol et se dirige vers les rivières, ruisseaux et océans. Le ruissellement joue un rôle important dans l'érosion du sol et dans le transport de nutriments et de sédiments.

B.1.1.6 L'Évaporation et la Sublimation

Sublimation : Ce processus implique la transformation directe de la neige ou de la glace en vapeur d'eau sans passer par l'état liquide. Cela se produit généralement dans les régions froides.

B.1.1.7 Le Stockage de l'Eau

L'eau se stocke dans divers réservoirs :

- Les océans représentent le plus grand réservoir d'eau sur Terre, avec environ 97% de l'eau totale de la planète.
- Les glaciers et calottes glaciaires contiennent environ 2% de l'eau douce de la planète.
- Les nappes phréatiques et les rivières/lacs contiennent une fraction très petite mais vitale de l'eau douce.

B.1.1.8 Le Cycle de l'Eau : Interactions et Processus

Les processus qui forment le cycle de l'eau sont interconnectés. Par exemple, l'évaporation entraîne une montée d'humidité dans l'atmosphère, qui, en se condensant, forme des nuages. Ces nuages provoquent des précipitations, qui peuvent soit s'infiltrer dans le sol, soit ruisseler à la surface du sol.

- Équilibre du Cycle : Bien que le cycle de l'eau soit un processus dynamique, il existe un certain équilibre entre les entrées et les sorties d'eau dans l'atmosphère et la surface terrestre. Environ 73% de l'eau de la planète provient de l'évaporation, tandis que 26% provient de l'évapotranspiration des plantes.
- Dynamique des Réservoirs : Les réservoirs d'eau sont en interaction constante, en particulier entre l'atmosphère et les réservoirs terrestres. Les réservoirs souterrains (nappes phréatiques) et les lacs agissent comme des régulateurs de l'eau, stockant de grandes quantités d'eau pendant les périodes de précipitations excessives et les libérant lentement pendant les périodes sèches.

B.1.1.9 Le Cycle de l'Eau et l'Agriculture

Le cycle de l'eau joue un rôle crucial en agriculture, car il régule la disponibilité de l'eau pour les cultures. Les précipitations, l'évaporation, l'infiltration et le ruissellement influencent la fertilité des sols et la productivité agricole (Denier-Pasquier, 2013).

- Précipitation : Elle fournit l'eau nécessaire à la croissance des plantes. Cependant, un excès ou un manque de précipitations peut entraîner des périodes de sécheresse ou des inondations.
- Infiltration : Une infiltration optimale permet d'assurer l'irrigation naturelle des sols, tout en maintenant leur structure et leur fertilité.
- Evapotranspiration : La gestion de l'irrigation prend en compte ce processus pour éviter le gaspillage d'eau et assurer une croissance optimale des plantes.

B.1.1.10 Impact du Changement Climatique sur le Cycle de l'Eau

Le climat de la planète et le cycle de l'eau terrestre ont une relation étroite et complexe (Fig. 30). Ainsi, les changements dans la variabilité du climat et les changements climatiques se propageront et influenceront sur les ressources en eau. Par exemple, le déficit pluviométrique affaiblira l'humidité des sols, le débit fluvial et la recharge des nappes phréatiques ; la magnitude de ces effets dépendra toutefois de conditions locales telles que les caractéristiques du sol, la géologie, la végétation et l'utilisation de l'eau (UNESCO , 2020).

Le changement climatique modifie le cycle de l'eau de manière significative. Il influence la température, les précipitations, les évapotranspirations et la disponibilité en eau pour les cultures. Donc le cycle de l'eau lui-même est également une composante essentielle du système climatique : il contrôle les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre et offre des mécanismes de retour d'informations pour le transport, le stockage et l'échange de masse et d'énergie (Fig. 30) (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008).

Les changements climatiques altéreront aussi le cycle de l'eau terrestre par l'intermédiaire de nombreux processus différents. Les retours et les interactions entre ces processus, qui ne sont pas tous bien compris ou mesurables aux échelles pertinentes, en rendent difficiles la quantification et la prévision des conséquences. Par ailleurs, le développement et la gestion des ressources en eau ont historiquement été entrepris en vertu du principe de stationnarité des séries hydrologiques temporelles (Milly , Dunne, & Vecchia, 2005). Bien que les données hydrologiques recueillies dans le passé offrent des informations précieuses sur les processus et les événements, elles ne sont pas forcément une indication du futur régime hydrologique. Par ailleurs, même si des changements hydrologiques sont détectés, les causes, y compris les changements climatiques, restent souvent incertaines

Les changements dans les précipitations et la température (Fig. 31) auront un impact direct sur le budget pour l'eau terrestre (Schewe et al., 2014). L'évaporation à partir de la surface terrestre se renforcera en conséquence de la tendance mondiale d'augmentation des températures de l'air dans toutes les régions, sauf les régions les plus arides, où le manque d'eau empêche ce renforcement. Il peut être déclenché par une augmentation des précipitations, mais dans de nombreuses régions, surtout celles où les volumes de précipitation diminueront, il provoquera la diminution des volumes d'écoulement fluvial et la disponibilité de l'eau au cours de différentes saisons (GIEC, 2018).

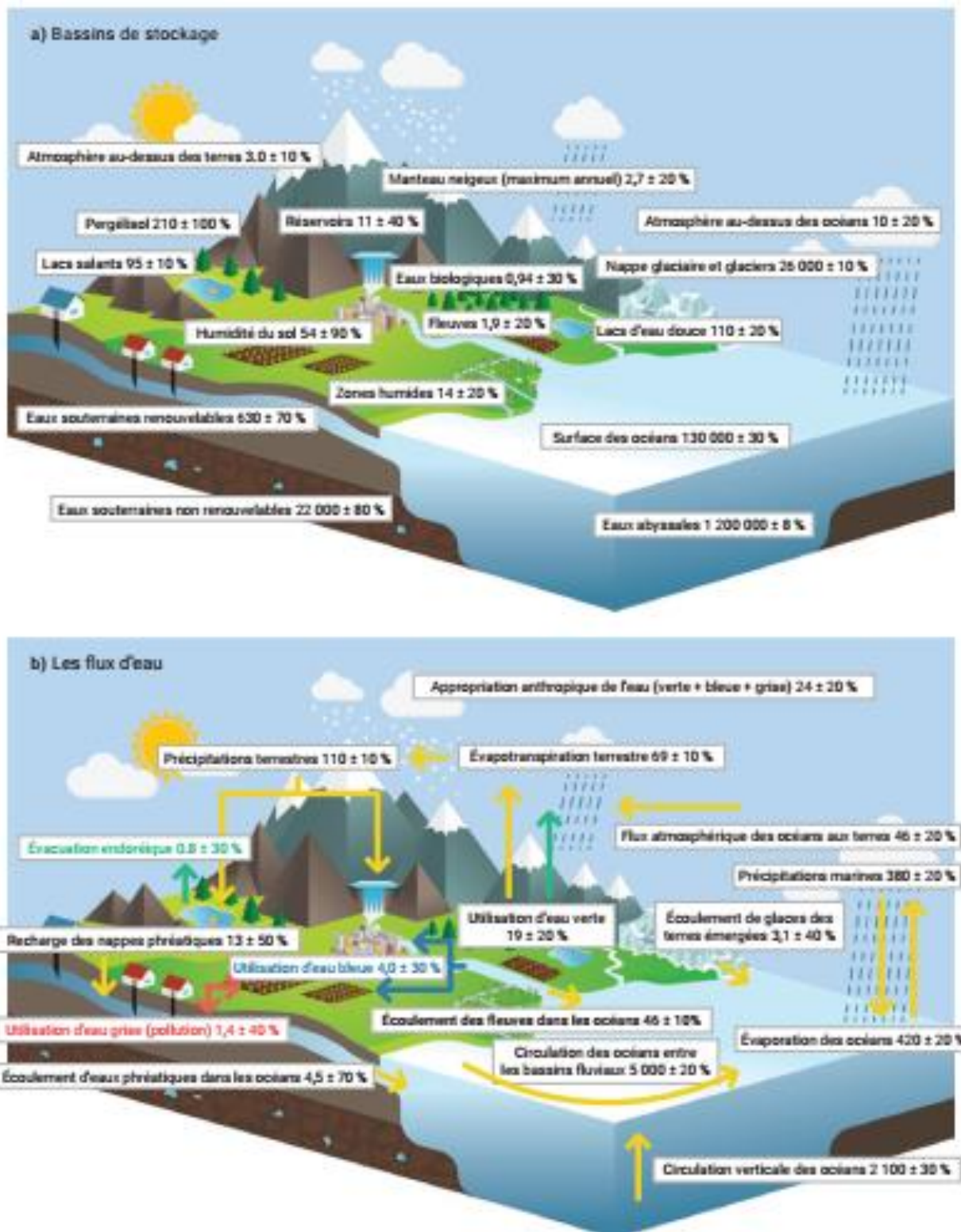


Figure 30. Impact de changement climatique sur les ressources en eau et le cycle de l'Eau (UNESCO, 2020).

Ces changements sont susceptibles d'exacerber le stress hydrique, qui fait partie des principaux problèmes que rencontreront de nombreuses sociétés et la planète au cours du XXI^e siècle. Au cours du siècle dernier, l'utilisation de l'eau a augmenté à un taux plus de deux fois plus élevé

que celui de la croissance démographique (FAO, 2013). Associée à un approvisionnement plus erratique et incertain, cette utilisation renforcée aggravera la situation de stress hydrique des régions déjà touchées et générera un stress hydrique dans les régions où les ressources en eau sont pour l'instant abondantes (Fig.31).

Le stress hydrique influe déjà sur tous les continents (Fig. 31). La pénurie d'eau physique est souvent un phénomène saisonnier et non un phénomène chronique, mais les changements climatiques sont susceptibles d'altérer la disponibilité de l'eau tout au long de l'année dans plusieurs régions (GIEC, 2018). Près de 4 milliards de personnes sont touchées par la pénurie d'eau physique sévère pendant au moins un mois par an (Mekonnen & Hoekstra, 2012). Près de 1,6 milliard de personnes, soit plus d'un quart aujourd'hui de la population mondiale, subit la pénurie d'eau, ce qui signifie que cette population ne dispose pas des infrastructures nécessaires pour avoir accès à l'eau (ONU-Eau, 2014).

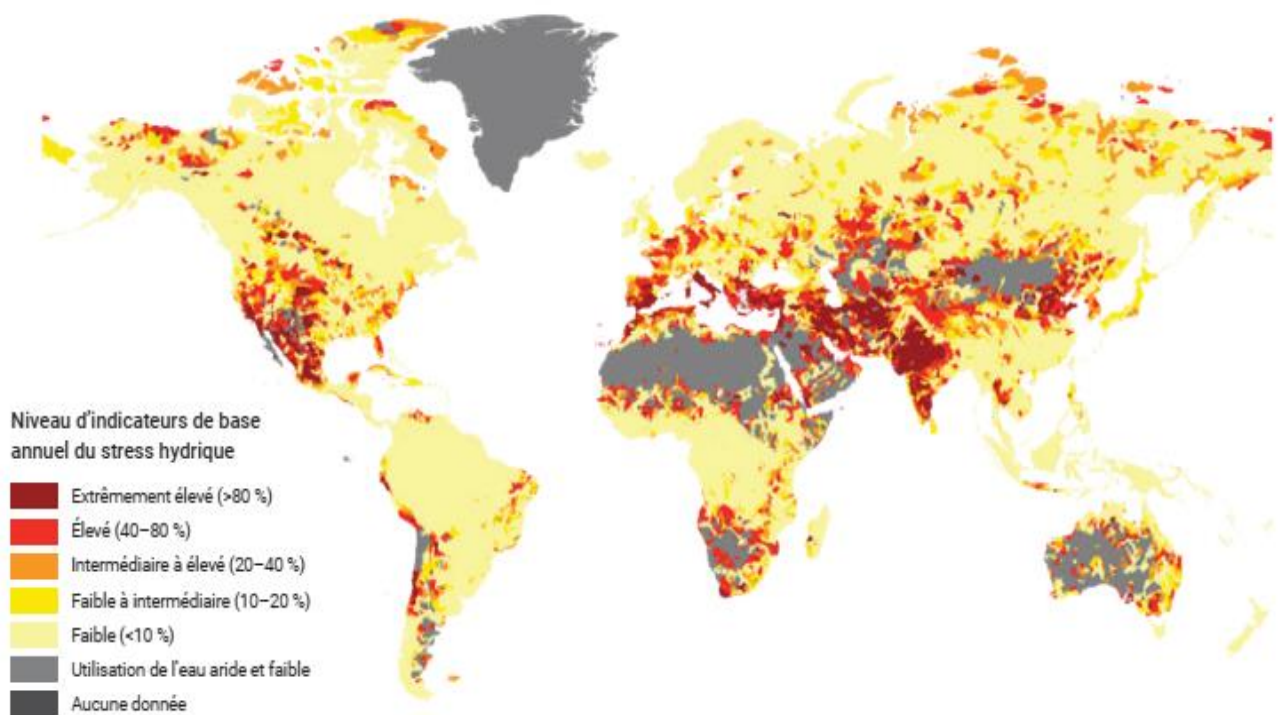


Figure 31. Carte de répartition du stress hydrique à l'échelle mondiale (UNESCO, 2020).

B.2. L'eau dans le sol

L'eau dans le sol est essentielle à la croissance des plantes et à la productivité agricole. Elle est directement liée à plusieurs processus écologiques, chimiques et biologiques, notamment l'infiltration, la rétention, la disponibilité pour les plantes, ainsi que les interactions avec les

nutriments et la structure du sol. Comprendre les propriétés et les dynamiques de l'eau dans le sol est crucial pour optimiser l'utilisation de cette ressource en agriculture, en particulier face aux défis du changement climatique et de la sécheresse (Leenhardt, Voltz, & Barreteau, 2020).

B.2.1. Les propriétés de l'Eau dans le Sol

La présence de l'eau dans le sol joue un rôle très important, on s'intéresse à l'eau libre qui peut circuler entre les grains, cette eau saturant un massif de terrain construit une nappe souterraine, le plus souvent à surface libre ou parfois localisée entre deux formations imperméables c'est la nappe captive.

L'eau dans le sol se divise en plusieurs formes selon sa disponibilité et sa capacité à interagir avec les particules du sol (Bonnefont, 2003) (Fig. 31) :

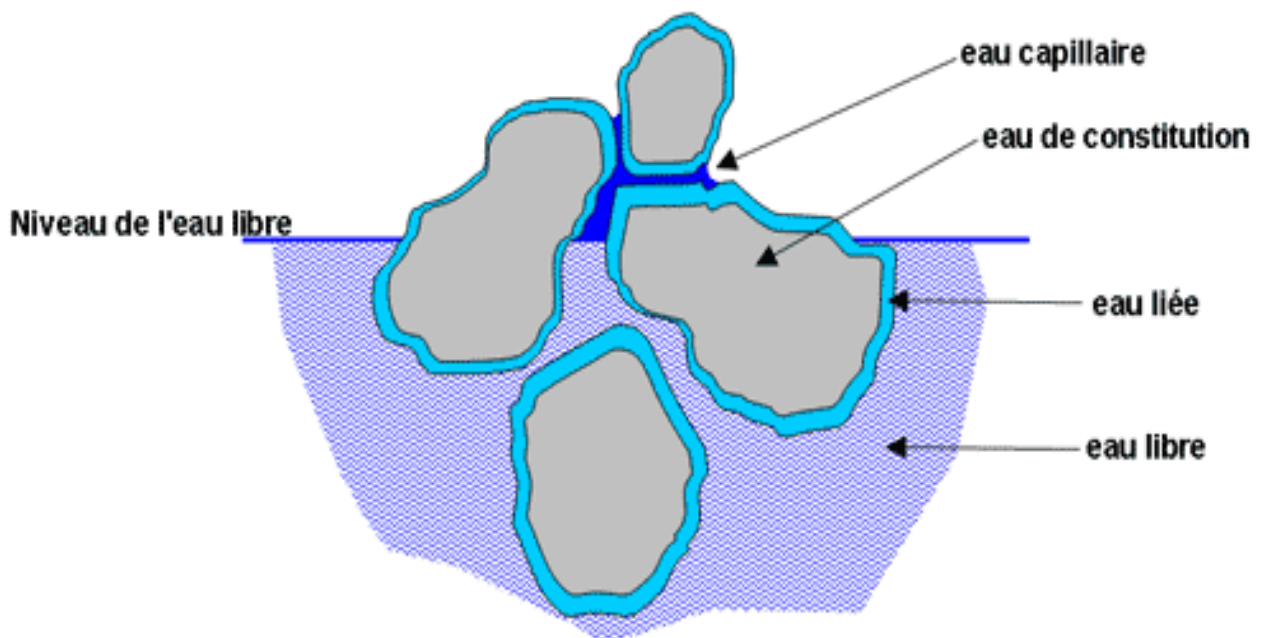


Figure 32. Les différentes formes de l'eau dans le sol

B.2.1.1 L'Eau Gravité

L'eau gravitaire, aussi appelée eau libre ou eau de drainage, est la fraction d'eau dans le sol qui se déplace sous l'effet de la gravité. Elle occupe les macropores (pores de diamètre $> 50 \mu\text{m}$) et n'est pas retenue par les forces de capillarité.

L'eau gravitationnelle est l'eau qui se déplace librement sous l'effet de la gravité. Elle se déplace rapidement à travers le sol et s'écoule souvent vers les nappes phréatiques ou les cours d'eau. Elle n'est généralement pas disponible pour les plantes, car elle quitte rapidement la zone racinaire du sol (Brady & Weil, 2008).

Caractéristiques principales :

- Elle s'écoule verticalement dans le sol lorsque celui-ci est saturé
- Elle n'est pas disponible pour les plantes car elle percole trop rapidement
- Son mouvement suit la loi de Darcy qui décrit l'écoulement d'un fluide en milieu poreux

La dynamique de l'eau gravitaire est essentielle pour comprendre :

- Le drainage naturel des sols
- La recharge des nappes phréatiques
- Les risques de lessivage des nutriments

B.2.1.2 L'Eau Capillaire

L'eau capillaire est une forme d'eau retenue dans le sol par les forces de tension superficielle et de capillarité. Elle occupe les micropores (pores de diamètre compris entre 0,2 et 50 μm) et représente la principale source d'eau disponible pour les plantes (Duchaufour, Faivre, & Poulénard, 2024).

Caractéristiques physiques :

- Elle est retenue dans le sol à des potentiels matriciels compris entre pF 2,5 et pF 4,2
- Elle forme des films et des ménisques autour des particules de sol
- Son mouvement peut se faire dans toutes les directions, contrairement à l'eau gravitaire

La rétention de l'eau capillaire dépend de plusieurs facteurs :

- La texture du sol (proportion d'argile, de limon et de sable)
- La structure du sol (arrangement des agrégats)
- La teneur en matière organique
- La température du sol

Cette eau est particulièrement importante car :

- Elle constitue la réserve utile en eau du sol pour les plantes
- Elle permet le transport des nutriments
- Elle influence la stabilité structurale du sol

B.2.1.3 L'Eau Hygroscopique

L'eau hygroscopique est une petite quantité d'eau qui est fortement attachée aux particules de sol, surtout dans les sols secs. Elle est généralement inaccessible pour les plantes, car elle est fortement adsorbée par les particules du sol.

L'eau hygroscopique est la forme d'eau la plus fortement liée aux particules du sol. Voici une analyse approfondie (Kutílek & Nielsen, 1994):

- Définition et caractéristiques physiques : C'est un film d'eau très mince (environ 0,001 µm d'épaisseur). Adsorbée directement sur les particules minérales et organiques du sol. Retenue par des forces d'attraction moléculaire très puissantes. Son potentiel matriciel est supérieur à pF 4,2. Elle n'est pas disponible pour les plantes. Elle ne peut être éliminée qu'à des températures supérieures à 105°C
- Mécanismes de rétention : Adsorption physique due aux forces de Van der Waals. Liaison par ponts hydrogène avec les surfaces minérales. Attraction électrostatique avec les particules chargées du sol.
- Facteurs influençant sa quantité : Surface spécifique des particules (particulièrement importante pour les argiles). Type d'argiles présentes (montmorillonite > illite > kaolinite). Teneur en matière organique. Humidité relative de l'atmosphère du sol. Température du sol.

B.2.1.4 L'Eau Saturé

L'eau saturé se trouve dans les pores du sol, remplissant tout l'espace poreux. Elle est généralement présente dans les sols sous conditions de saturation, comme après une pluie intense ou une irrigation excessive. À ce moment-là, l'oxygénation des racines peut être réduite, créant des conditions anaérobies.

B.2.2. Le Mouvement de l'Eau dans le Sol

Le mouvement de l'eau dans le sol est un phénomène complexe qui régit de nombreux processus essentiels dans les écosystèmes terrestres. ce mouvement est gouverné par plusieurs forces qui agissent simultanément dans le milieu poreux qu'est le sol (Hillel, 1998).

L'eau se déplace principalement sous l'effet de gradients de potentiel hydrique total, qui combine différentes composantes. Le potentiel gravitaire, toujours orienté verticalement vers le bas, est une force constante qui entraîne l'eau vers les horizons profonds. Le potentiel matriciel, quant à lui, est lié aux forces de rétention exercées par la matrice du sol et peut

provoquer des mouvements dans toutes les directions. Cette dynamique est particulièrement bien décrite dans les travaux de (Musy & Soutter, 1991).

B.2.2.1 Infiltration

L'infiltration est le processus par lequel l'eau pénètre dans le sol à partir de la surface. La vitesse d'infiltration dépend de plusieurs facteurs, tels que la texture du sol, son taux de compaction, sa structure et son humidité initiale. Par exemple, les sols argileux ont une faible vitesse d'infiltration, tandis que les sols sableux sont plus perméables à l'eau (Hillel, 2003).

D'après (Musy & Soutter, 1991), L'infiltration est le processus par lequel l'eau pénètre dans le sol à partir de sa surface. Ce processus est fondamental dans le cycle hydrologique et détermine la répartition des eaux de pluie entre le ruissellement et l'alimentation des nappes souterraines.

La dynamique de l'infiltration se déroule en plusieurs phases distinctes, comme l'expliquent Musy et Soutter (1991). La première phase, dite d'imbibition, est caractérisée par une entrée rapide de l'eau dans le sol sec, où les forces capillaires dominent. Cette phase est suivie d'une période transitoire pendant laquelle le taux d'infiltration diminue progressivement, reflétant l'établissement d'un équilibre entre les forces en présence. Finalement, une phase permanente s'établit, où le taux d'infiltration se stabilise sous l'influence prédominante de la gravité.

La mesure de l'infiltration peut être réalisée par différentes méthodes, tant sur le terrain qu'en laboratoire. Décrit l'utilisation de l'infiltromètre à double anneau comme une méthode standard de terrain. Cet instrument, constitué de deux anneaux concentriques enfoncés dans le sol, permet de mesurer la vitesse de descente de l'eau dans l'anneau central, fournissant ainsi une estimation du taux d'infiltration (Fig. 33) (Johnson, 1961).

Une approche plus sophistiquée est proposée avec l'infiltromètre à tension, qui permet de caractériser l'infiltration sous différentes tensions contrôlées. Cette méthode est particulièrement utile pour étudier le rôle des macropores dans le processus d'infiltration. En parallèle, les simulateurs de pluie, offrent la possibilité de reproduire artificiellement des conditions pluvieuses contrôlées et d'étudier simultanément l'infiltration et le ruissellement (Ankeny, 1992).

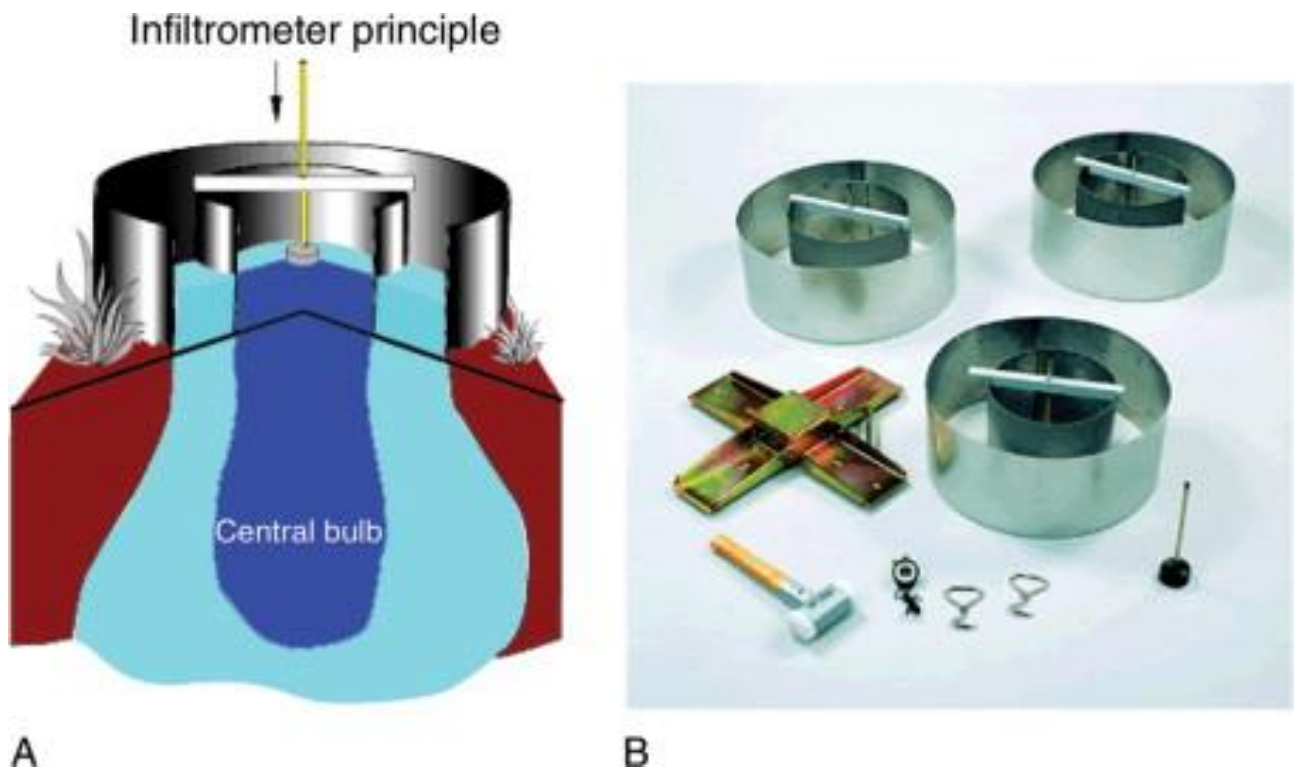


Figure 33. Méthode de doubles anneaux pour mesurer l'infiltration de l'eau dans le sol

B.2.2.2 Capacité de Rétention d'Eau

La capacité de rétention d'eau du sol est une propriété fondamentale qui détermine la quantité d'eau que le sol peut stocker et rendre disponible pour les plantes. Cette propriété est influencée par de multiples facteurs physiques et chimiques du sol (Brady & Weil, 2008).

En effet on peut définir la capacité de rétention comme la quantité d'eau retenue par le sol après que l'eau gravitaire s'est écoulée, généralement mesurée à un potentiel matriciel de pF 2,5 (environ -33 kPa). Cette valeur correspond approximativement à la "capacité au champ", un concept agronomique important (Musy & Soutter, 1991).

Les mécanismes de rétention d'eau, comme l'explique Hillel (1998), reposent sur deux forces principales :

- Les forces capillaires, qui retiennent l'eau dans les micropores
- Les forces d'adsorption, qui lient les molécules d'eau aux surfaces des particules du sol

La texture du sol joue un rôle primordial dans la capacité de rétention. Les sols argileux peuvent retenir beaucoup plus d'eau que les sols sableux en raison de leur surface spécifique plus élevée et de leur plus grande proportion de micropores (Duchaufour, 1997).

La structure du sol influence également la rétention d'eau. Richards (1931) a démontré que l'arrangement des particules et la distribution des pores affectent directement la courbe de rétention d'eau. Cette courbe, aussi appelée courbe pF, décrit la relation entre la teneur en eau et le potentiel matriciel.

Paramètres caractéristiques importants selon (Lal & Shukla, 2004) :

Capacité au champ (CC) :

La capacité au champ représente la quantité d'eau retenue par le sol après ressuyage de l'eau gravitaire (24 à 48 heures après une pluie ou une irrigation abondante). Selon Brady et Weil (2008), elle correspond à, un potentiel matriciel de pF 2,5 (environ -33 kPa)

Une teneur en eau variant selon la texture :

- Sols sableux : 10-20%
- Sols limoneux : 20-30%
- Sols argileux : 30-40%

La capacité au champ est généralement exprimée en termes de volume d'eau retenu par volume de sol (en %). Elle est déterminée par des mesures de tension capillaire du sol.

Le point de flétrissement permanent (PFP) :

Le point de flétrissement permanent comme la teneur en eau du sol en dessous de laquelle les plantes ne peuvent plus extraire l'eau et flétrissent de manière irréversible. Il correspond à un potentiel matriciel de pF 4,2 (environ -1500 kPa) (Brady & Weil, 2017)

Une teneur en eau variant selon la texture :

- Sols sableux : 4-8%
- Sols limoneux : 8-12%
- Sols argileux : 15-20%

La réserve facilement utilisable (RFU) :

La réserve facilement utilisable (RFU) représente la quantité d'eau disponible dans le sol qui peut être absorbée par les racines des plantes sans contrainte importante. Elle correspond à l'eau située entre le point de saturation du sol (capacité au champ) et le point de flétrissement permanent. (Comstock, 2002) :

Caractéristiques

- L'eau dans cette zone est suffisamment disponible pour les plantes, ni trop libre (comme l'eau gravitationnelle) ni trop fortement retenue (comme l'eau hygroscopique).
- La réserve facilement utilisable dépend de la texture du sol et de la profondeur du sol. Dans les sols sableux, la RFU est plus faible que dans les sols argileux, en raison de la rapidité du drainage de l'eau.
- Elle est utilisée pour évaluer la quantité d'eau qu'un sol peut fournir aux plantes avant que des manques d'eau ne surviennent, influençant directement la stratégie d'irrigation.

Calcul de la RFU

La RFU est souvent calculée comme la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement : **RFU=Capacité au champ–Point de flétrissement permanent**

Le point de flétrissement permanent (PFP) :

Le point de flétrissement permanent (PFP) est le point où l'eau dans le sol est retenue de manière si forte par les particules du sol que les racines des plantes ne peuvent plus l'extraire, provoquant ainsi le flétrissement irréversible des plantes. C'est la limite de l'eau disponible pour les plantes.

Caractéristiques

- Le PFP se situe à une tension du sol d'environ 1500 kPa (kilopascals), où l'eau est fortement liée aux particules du sol.
- Lorsqu'un sol atteint son point de flétrissement, les plantes commencent à perdre de l'eau par transpiration à un rythme plus rapide que ce qu'elles peuvent absorber, ce qui peut entraîner des stress hydriques et, dans les cas graves, la mort de la plante.
- Le PFP est influencé par la texture et la structure du sol, ainsi que par la quantité de matière organique présente. Les sols argileux ont un PFP plus élevé que les sols sableux en raison de la capacité plus forte des particules fines à retenir l'eau.

Mesure : Le point de flétrissement est mesuré à l'aide de tensiomètres ou de courbes de rétention d'eau du sol, qui permettent de déterminer la quantité d'eau restée dans le sol à différentes tensions.

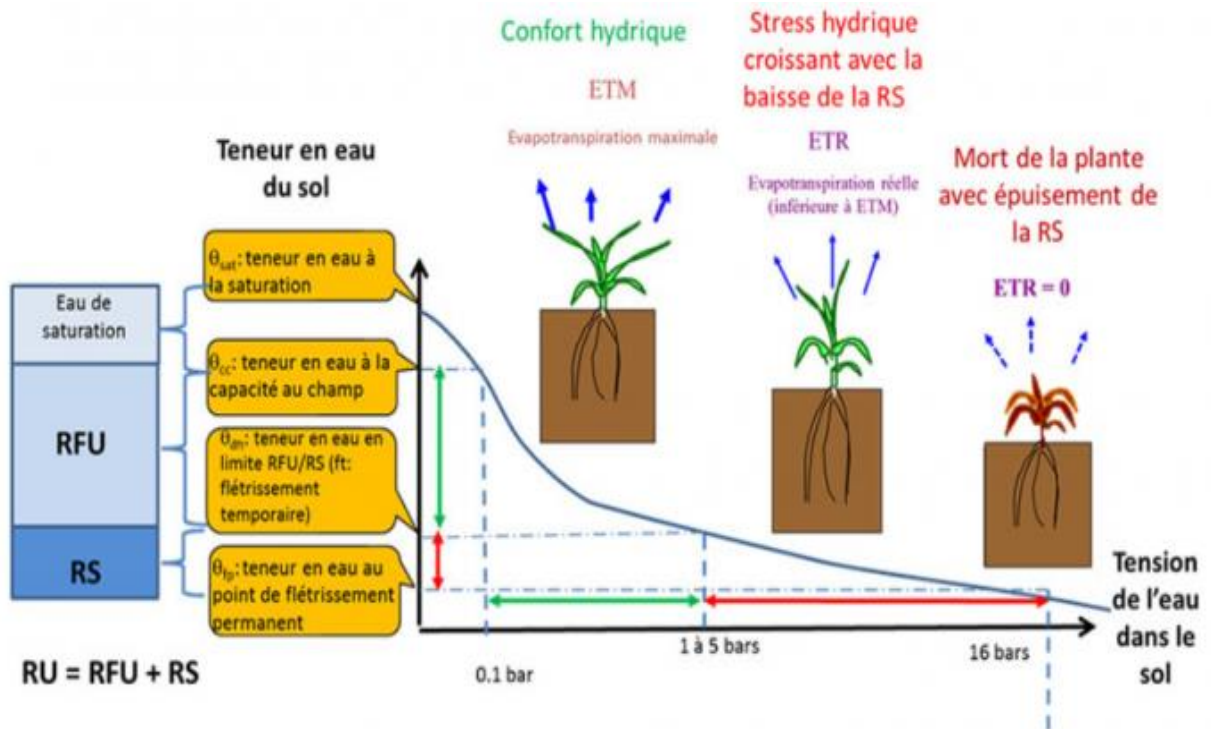


Figure 34. Schéma présentatif des réserves d'eau dans le sol.

Relations entre ces paramètres (Duchaufour, 2001) :

La Réserve Utile (RU) = CC - PFP

La RFU représente la partie de la RU facilement accessible

Au-delà de la RFU, les plantes commencent à subir un stress hydrique

Disponibilité de l'Eau pour les Plantes : L'eau disponible pour les plantes se trouve dans la zone définie par la Capacité au Champ et le Point de Flétrissement Permanent. Tout l'eau située entre ces deux points fait partie de la Réserve Facilement Utilisable (RFU), c'est-à-dire l'eau accessible aux racines des plantes sans qu'elles ne souffrent de stress hydrique.

Relation entre la RFU et la gestion de l'eau :

La Réserve Facilement Utilisable est la quantité d'eau dont les plantes peuvent disposer avant d'atteindre le Point de Flétrissement Permanent. C'est donc une mesure clé pour déterminer quand un sol doit être irrigué pour éviter que les plantes ne souffrent de sécheresse.

En effet, si l'humidité du sol descend en dessous de la Capacité au Champ, mais au-dessus du Point de Flétrissement, la plante peut encore utiliser une partie de l'eau, mais elle commencera à subir du stress.

Lorsque le sol atteint son Point de Flétrissement Permanent, l'eau dans le sol devient inaccessible aux racines des plantes, et celles-ci commencent à se faner.

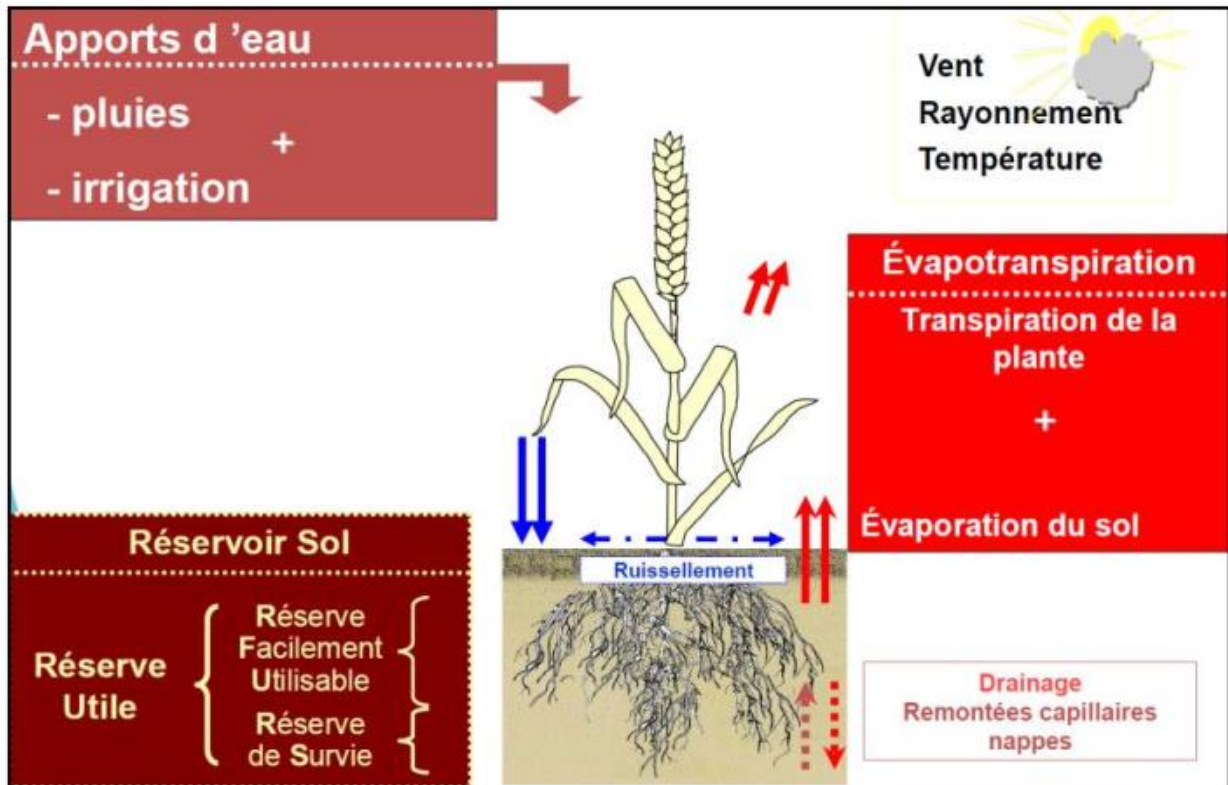


Figure 35. Schéma du système Sol, Plan et Climat (Arvalis, 2021).

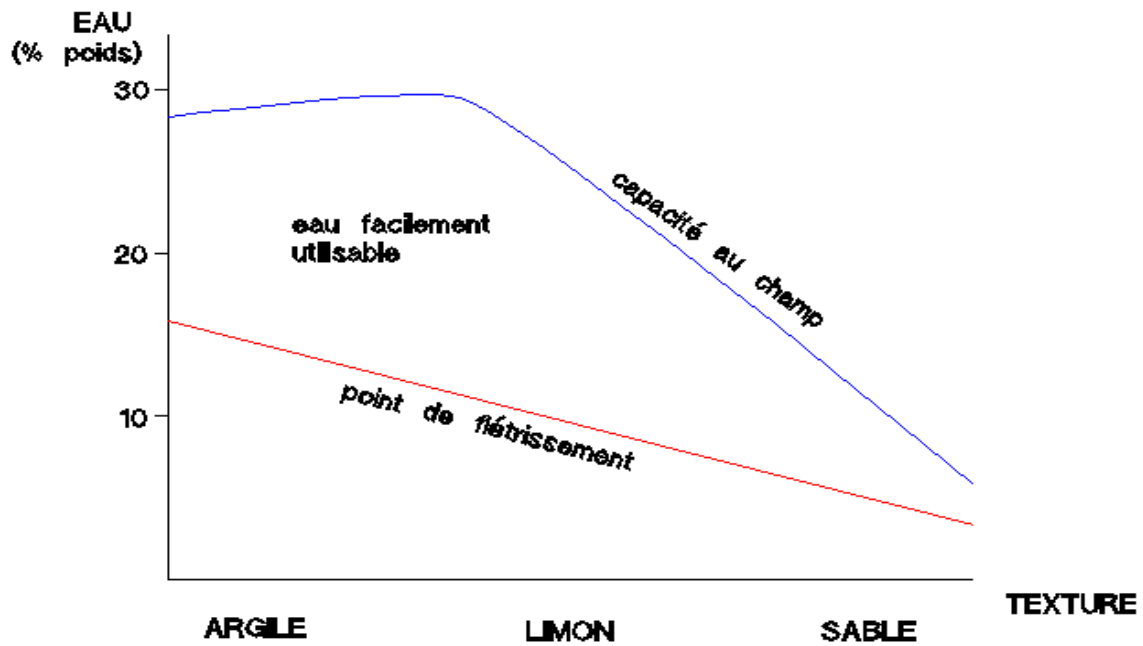


Figure 36. Les réserves d'eau dans les sols par apport à la texture

B.2.2.3 Évapotranspiration et Perte d'Eau

L'évaporation et la perte d'eau en agriculture représentent des processus complexes qui jouent un rôle crucial dans la gestion des ressources hydriques agricoles. L'évaporation dans le sol suit une dynamique en trois phases distinctes, chacune ayant ses propres caractéristiques et mécanismes dominants (Hillel, 1998).

La première phase, caractérisée par une évaporation rapide et constante, est principalement contrôlée par les conditions atmosphériques. Durant cette phase, le sol peut fournir suffisamment d'eau à la surface pour répondre à la demande évaporative atmosphérique. La seconde phase montre une diminution progressive du taux d'évaporation, où les propriétés hydrauliques du sol commencent à limiter le flux d'eau vers la surface. La troisième phase, beaucoup plus lente, est dominée par le transport de l'eau sous forme de vapeur à travers les pores du sol (Comstock, 2002).

Facteurs Influençants sur l'Évapotranspiration : L'évapotranspiration est influencée par de nombreux facteurs tels que la température, l'humidité relative de l'air, le vent, et la couverture végétale. Les plantes plus végétatives ou les sols plus humides entraînent une évapotranspiration plus élevée (Monteith, 1965).

- Température de l'air et du sol : Des températures élevées augmentent la capacité de l'air à évaporer de l'eau.
- Humidité relative de l'air : Un air sec (faible humidité) favorise l'évaporation, tandis que de l'air humide (forte humidité) la ralentit.
- Vitesse du vent : Des vents forts augmentent la vitesse d'évaporation en dispersant la vapeur d'eau près de la surface du sol.
- Couverture végétale : Les sols nus ont des taux d'évaporation plus élevés par rapport aux sols couverts par des plantes.

Transpiration : La transpiration est le processus par lequel les plantes libèrent de la vapeur d'eau dans l'atmosphère à partir de leurs feuilles, via des structures appelées stomates. L'eau transpirée provient directement de l'eau du sol absorbée par les racines de la plante (Taiz, Zeiger, Møller, & Murphy).

Facteurs influençant la transpiration :

- Température : Comme pour l'évaporation, la température de l'air et des tissus végétaux influence la transpiration. Une température plus élevée entraîne une plus grande perte d'eau.
- Humidité relative de l'air : Une humidité plus faible augmente la transpiration, tandis qu'une humidité élevée peut la limiter.
- Vitesse du vent : Des vents forts augmentent la transpiration en accélérant l'évaporation d'eau à la surface des feuilles et en maintenant un gradient de vapeur d'eau.
- Disponibilité de l'eau dans le sol : Si l'eau du sol est abondante, la transpiration sera élevée. Si le sol devient sec, la transpiration peut être réduite par la plante (par exemple, par la fermeture des stomates).

Evapotranspiration (ET) : L'évapotranspiration (ET) est la somme de l'évaporation et de la transpiration. Elle représente la perte totale d'eau d'un sol vers l'atmosphère due aux deux processus combinés. L'ET est un indicateur clé pour comprendre la demande en eau d'une culture et les besoins en irrigation. Formule de l'Evapotranspiration l'ET peut être exprimée par la relation suivante :

$$ET = E + T \quad \text{où :}$$

E ; est l'évaporation du sol,

T : est la transpiration des plantes.

Facteurs influençant l'Evapotranspiration : L'ET dépend de plusieurs facteurs environnementaux, notamment (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998) :

- Climat : Température, humidité, précipitations et vent affectent les taux d'ET.
- Couverture végétale : Plus la couverture végétale est dense, plus la transpiration est importante.
- Type de sol : Les sols argileux, par exemple, peuvent retenir plus d'eau, limitant ainsi l'évaporation, tandis que les sols sableux facilitent le drainage et peuvent réduire l'ET.
- Phase de développement de la culture : Les besoins en eau augmentent généralement pendant la phase de croissance rapide des plantes, surtout en période de floraison et de fructification.

Mesure de l'Evapotranspiration : L'Evapotranspiration peut être mesurée de différentes manières (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998):

- Méthode de la Lysimétrie : L'un des moyens les plus précis pour mesurer l'ET consiste à utiliser des lysimètres, qui mesurent la perte d'eau d'une parcelle de sol.
- Méthode de la balance d'eau : La balance d'eau est utilisée pour calculer l'ET en comparant les entrées et sorties d'eau dans un système, en tenant compte des précipitations, de l'infiltration, et de la perte par évapotranspiration.
- Modèles climatiques et outils de calcul : Des modèles comme le modèle FAO Penman-Monteith permettent d'estimer l'ET à partir de données climatiques (température, humidité, vitesse du vent, etc.).

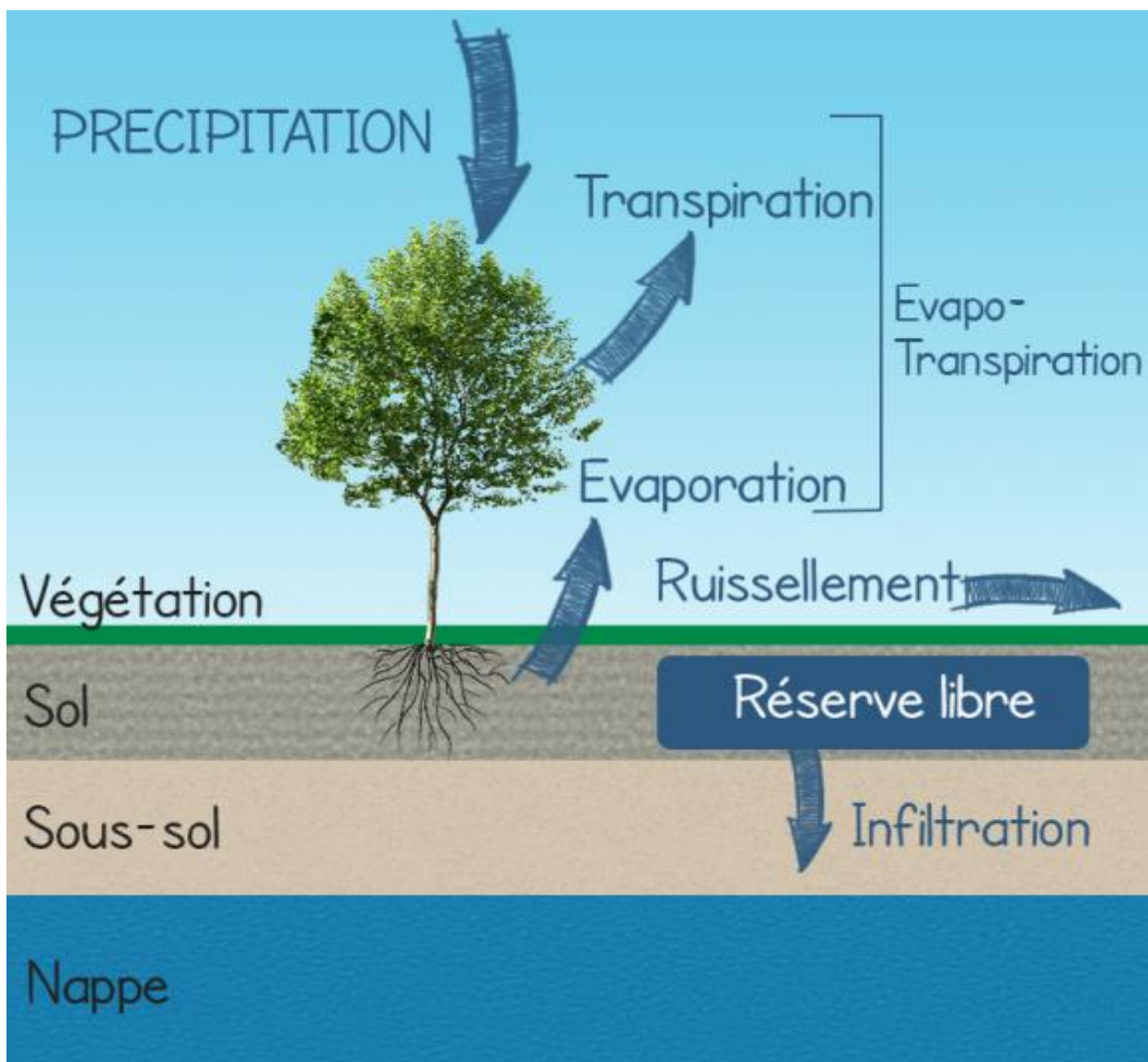


Figure 37. Schéma explicatif de phénomène d'évaporation et d'évapotranspiration et perte d'eau.

B.2.3. Absorption racinaire de l'eau

L'absorption racinaire de l'eau est un processus essentiel pour la croissance des plantes. L'eau est transportée du sol vers les racines par un mécanisme complexe, impliquant des processus physiques et biologiques. Ce processus dépend de plusieurs facteurs, y compris la structure des racines, la présence de solutions nutritives dans le sol, et les caractéristiques physiologiques de la plante (Marschner, 2011).

B.2.3.1 Phases de l'Absorption Racinaire

L'absorption des plantes passe par différentes étapes (Marschner, 2011)

B.2.3.1.1 Absorption de l'eau au niveau des poils racinaire

Les poils racinaires jouent un rôle crucial dans l'absorption de l'eau. Ces structures microscopiques augmentent la surface de contact entre la racine et le sol, facilitant l'absorption de l'eau et des nutriments. L'absorption se produit principalement dans la zone d'élongation des racines, où les poils racinaires sont nombreux.

L'eau dans le sol est absorbée par osmose, un processus qui fait passer l'eau d'une région de faible concentration en solutés (le sol) vers une région de forte concentration en solutés (le cytoplasme des cellules racinaires).

B.2.3.1.2 Mouvement de l'Eau dans les Racines

Une fois que l'eau a été absorbée par les poils racinaires, elle entre dans la racine à travers des cellules épidermiques et se déplace dans le cortex. Le mouvement de l'eau dans la racine se fait par deux voies :

- Voie apoplasmique : L'eau circule dans les espaces intercellulaires sans entrer dans les cellules.
- Voie symplasmique : L'eau traverse les membranes cellulaires et passe d'une cellule à une autre par les plasmodesmes, des canaux microscopiques reliant les cellules végétales.

B.2.3.1.3 La Casparienne et Sélectivité de l'Absorption

Au niveau du cylindre central de la racine, l'eau rencontre la barrière de Caspary, une couche de cellules avec des bandes subérimifiées. Cette couche régule le passage de l'eau et des solutés vers le xylème, les tissus responsables du transport de l'eau dans la plante. La barrière de Caspary empêche l'entrée non sélective des substances, en forçant l'eau à passer par la voie symplasmique, permettant ainsi à la plante de contrôler les substances qu'elle absorbe.

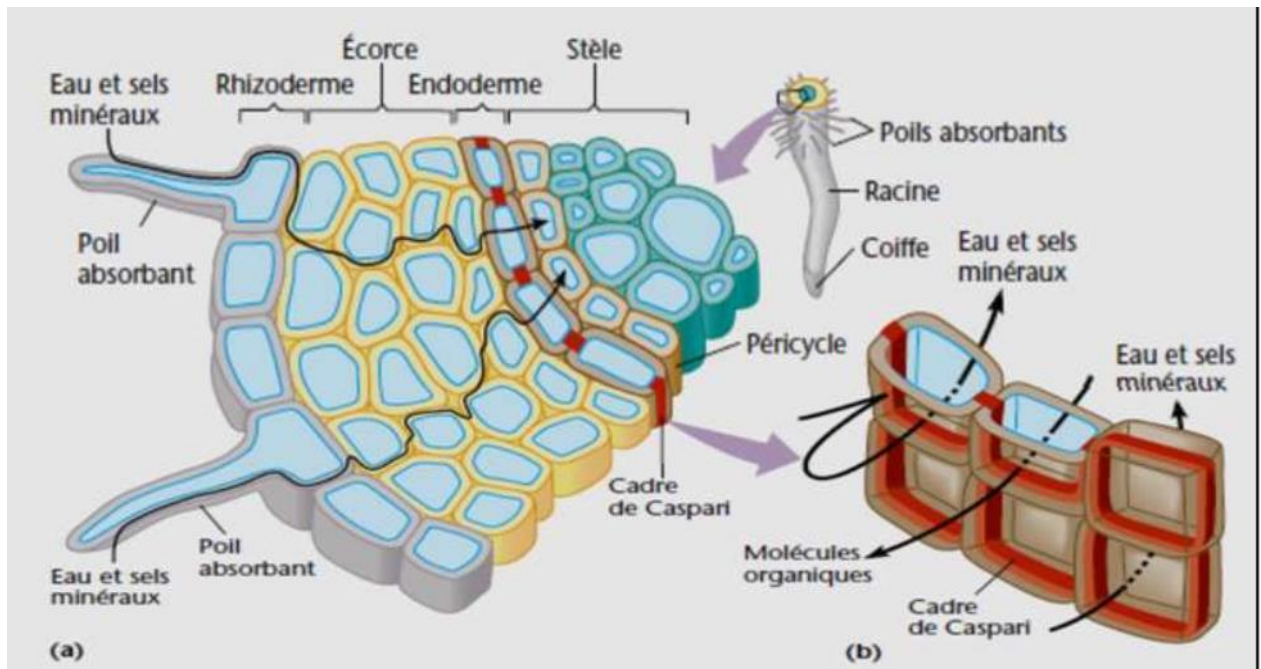


Figure 38. Présentation de mécanisme d'absorption d'eau et minéraux chez les plantes.

B.2.4. Facteurs influençant les besoins en eau des plantes

Les besoins en eau des plantes dépendent d'un ensemble complexe de facteurs environnementaux, physiologiques et biologiques. Ces facteurs influencent la quantité d'eau nécessaire pour maintenir une croissance optimale, réaliser la photosynthèse et assurer la survie des plantes dans différents contextes. En agriculture, une bonne compréhension de ces facteurs permet de mieux gérer l'irrigation et les ressources en eau (Six, Elliott, Paustian, & Doran, 1998).

B.2.4.1 Facteurs Environnementaux

B.2.4.1.1 Climat et Conditions Météorologiques

Le climat joue un rôle majeur dans la détermination des besoins en eau des plantes. Les conditions météorologiques locales telles que la température, l'humidité, le vent et les précipitations modifient les taux d'évapotranspiration, un facteur clé pour comprendre les besoins en eau des cultures (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

- **Température** : Des températures élevées augmentent la transpiration et l'évaporation de l'eau à partir du sol et des plantes, augmentant ainsi les besoins en eau.
- **Humidité relative** : Une faible humidité favorise l'évaporation et la transpiration, augmentant ainsi la demande en eau, tandis qu'une humidité élevée peut la réduire.
- **Vitesse du vent** : Le vent accélère l'évaporation de l'eau de la surface du sol et des feuilles, augmentant les besoins en eau des plantes.

- Précipitations et Disponibilité d'Eau : La quantité d'eau reçue sous forme de précipitations influe directement sur les besoins en eau. Les plantes peuvent compenser la déficience en eau par l'irrigation, mais elles nécessitent un apport suffisant pour éviter le stress hydrique (Wang , et al., 2012).

B.2.4.1.2 Facteurs Physiologiques de la Plante

Type de Plante (Plantes C3, C4 et CAM) : Les différentes formes de photosynthèse (C3, C4, CAM) influencent la consommation d'eau des plantes. Les plantes C4 et CAM sont généralement plus efficaces sur le plan de la conservation de l'eau que les plantes C3, car elles ont des mécanismes plus efficaces pour réduire la perte d'eau par transpiration (Nobel, 2009).

- Plantes C3 : Elles nécessitent plus d'eau, car elles ferment leurs stomates pendant la journée pour éviter la perte d'eau, mais cela limite l'entrée de CO₂ pour la photosynthèse.
- Plantes C4 : Elles sont mieux adaptées aux environnements chauds et secs, car elles utilisent le CO₂ plus efficacement.
- Plantes CAM : Ces plantes, comme les cactus, ouvrent leurs stomates la nuit pour minimiser la perte d'eau pendant la journée.

Stade de Croissance de la Plante : Les besoins en eau varient au cours des différentes étapes de développement d'une plante (Eck., Mathers, & Musick, 1987) :

- Germination et croissance initiale : Les besoins en eau sont relativement faibles, mais ils augmentent rapidement avec l'augmentation de la surface foliaire et de la transpiration.
- Croissance végétative : Durant cette phase, les plantes ont des besoins en eau élevés en raison de la croissance rapide des tissus.
- Floraison et fructification : La demande en eau est la plus élevée, car l'évapotranspiration est maximale et le processus de développement des fruits nécessite un apport continu d'eau.

B.2.4.2 Facteurs du Sol

B.2.4.2.1 Type de Sol et Capacité de Rétention d'Eau

Le type de sol affecte la disponibilité de l'eau pour la plante. Les sols argileux retiennent mieux l'eau que les sols sableux, mais les racines des plantes ont plus de difficulté à accéder à l'eau dans les sols argileux en raison de leur faible aération (Hillel, 2003).

- Sols argileux : Ils retiennent bien l'eau, mais peuvent entraîner un stress pour les racines si l'humidité est trop élevée ou si le sol devient compacté.
- Sols sableux : Ils ont une faible capacité de rétention en eau, mais l'eau est plus facilement accessible aux racines.
- Capacité au champ et point de flétrissement : Ces propriétés du sol déterminent la quantité d'eau que le sol peut retenir et la quantité disponible pour la plante.

B.2.4.2.2 Profondeur des Racines et Structure du Sol

Les racines profondes peuvent accéder à des réserves d'eau plus profondes dans le sol, réduisant ainsi la dépendance à l'irrigation. La structure du sol, y compris la présence de couches compactées, peut entraver l'accès des racines à l'eau.

Profondeur des racines : Les racines profondes peuvent exploiter l'eau dans les couches plus profondes, mais leur capacité à capter de l'eau dépend également de la structure du sol et de la présence de nappe phréatique (Kramer & Boyer, 1995).

B.2.4.3 Facteurs Biotiques et de Gestion

B.2.4.3.1 Compétition pour l'Eau

La compétition entre les plantes, notamment dans des environnements agricoles ou naturels densément peuplés, peut réduire les ressources en eau disponibles pour chaque plante, augmentant ainsi les besoins en eau par plante. Compétition entre cultures : Dans un champ, les plantes peuvent se faire concurrence pour l'eau, ce qui influence leurs besoins en irrigation.

B.2.4.3.2 Pratiques Agricoles et Irrigation

Les pratiques de gestion de l'irrigation jouent un rôle crucial dans les besoins en eau des plantes. L'irrigation mal gérée peut entraîner une surcharge d'eau ou une pauvreté en eau, affectant la santé des plantes. Méthodes d'irrigation : L'irrigation goutte-à-goutte et l'irrigation par aspersion ont des impacts différents sur la gestion de l'eau (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

B.2.4.4 Interactions Entre Les Facteurs

Les besoins en eau des plantes sont déterminés par l'interaction complexe entre les facteurs ci-dessus. Par exemple, un sol sableux dans un environnement chaud avec des températures élevées augmentera considérablement les besoins en eau par évapotranspiration. En revanche, une plante cultivée dans un sol argileux et humide aura des besoins en eau moins fréquents, mais peut avoir des difficultés à respirer si l'humidité reste trop élevée.

B.3. Gestion de l'eau en agriculture

La gestion de l'eau en agriculture est essentielle pour garantir une utilisation durable et efficace de cette ressource précieuse. Elle implique l'adaptation des pratiques agricoles à des conditions climatiques et de sol variables, l'optimisation de l'irrigation, la conservation de l'eau et la gestion de la qualité de l'eau. Avec les défis croissants du changement climatique, la gestion de l'eau devient une priorité pour la sécurité alimentaire et la durabilité de l'agriculture. Voici une explication détaillée de cette gestion, avec des références (Leenhardt, Voltz, & Barretea, 2020).

B.3.1. Importance de la Gestion de l'Eau en Agriculture

L'agriculture est l'un des secteurs les plus grands consommateurs d'eau, en particulier pour l'irrigation. Les besoins en eau pour les cultures varient considérablement selon le type de culture, le climat, le sol et les méthodes de gestion utilisées. Une gestion inefficace de l'eau peut entraîner (Leenhardt, Voltz, & Barretea, 2020) :

- Des pertes d'eau par évaporation ou infiltration excessive.
- Des pénuries d'eau dans les périodes de sécheresse.
- La salinisation des sols due à une irrigation mal gérée.
- La dégradation des sols causée par l'érosion liée à une irrigation inappropriée.
- L'optimisation de l'utilisation de l'eau permet de maximiser les rendements agricoles tout en préservant cette ressource.

B.3.2. Pratiques de Gestion de l'Eau en Agriculture

L'un des axes majeurs de cette gestion concerne l'irrigation et l'efficacité de l'eau. Diverses techniques d'irrigation existent, allant des méthodes traditionnelles comme l'irrigation de surface (rigoles, bassins), peu coûteuses mais gourmandes en eau, aux systèmes plus modernes et performants. L'irrigation par aspersion, bien qu'offrant une meilleure distribution de l'eau, reste sensible aux pertes par évaporation et au vent. La micro-irrigation, comprenant le goutte-à-goutte et la micro-aspersion, se distingue par son efficacité élevée grâce à un apport d'eau localisé au plus près des racines, minimisant ainsi les pertes. L'irrigation souterraine, quant à elle, représente une solution encore plus performante en réduisant les pertes par évaporation et les maladies foliaires, mais son coût d'installation est généralement plus élevé. Le pilotage précis de l'irrigation est également essentiel, s'appuyant sur des méthodes tensiométriques mesurant la tension de l'eau dans le sol, des sondes d'humidité du sol évaluant la teneur en eau, ou encore l'utilisation de modèles agro-hydrologiques simulant le bilan hydrique des cultures pour optimiser les apports (Siebert, Henrichs, Frenken, & Burke, 2010).

B.3.3. Méthodes d'Irrigation

L'irrigation est la méthode principale pour gérer l'approvisionnement en eau des cultures. Les principales techniques sont :

B.3.3.1 Irrigation de surface (par gravité)

L'irrigation de surface est l'une des techniques les plus anciennes et les plus couramment utilisées pour l'irrigation des cultures agricoles. Elle consiste à faire couler de l'eau sur la surface du sol, permettant ainsi à l'eau de s'infiltrer dans le sol et d'atteindre les racines des plantes. Cette méthode est utilisée dans de nombreuses régions du monde, particulièrement dans les zones où les autres méthodes d'irrigation, comme l'irrigation goutte-à-goutte ou par aspersion, ne sont pas accessibles en raison de coûts ou de ressources limitées (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

B.3.3.1.1 Principes de l'Irrigation de Surface

L'irrigation de surface repose sur la diffusion de l'eau sur le sol en raison de la gravité. L'eau peut être répartie à travers un certain nombre de techniques, en fonction des caractéristiques du terrain et de l'infrastructure disponible. Le but est de fournir une quantité d'eau suffisante pour maintenir un approvisionnement en eau des cultures tout en minimisant le gaspillage.

Types d'Irrigation de Surface : Il existe plusieurs types d'irrigation de surface, chacun ayant des avantages et des inconvénients en fonction des caractéristiques du sol, de la culture, du climat et de la topographie. Les principales méthodes sont (Kramer & Boyer, 1995; Shah , et al., 2024) :

- Inondation : Cette méthode consiste à immerger le champ sous une couche d'eau. Elle est souvent utilisée dans les zones de culture du riz, où l'eau est maintenue à une hauteur suffisante pour recouvrir les racines.
- Furrow Irrigation (Irrigation par rigoles) : L'eau est dirigée dans des rigoles ou des sillons entre les rangs de plantes. Cette méthode est plus économique que l'inondation, mais elle est généralement utilisée dans des champs plats et bien nivelés.
- Basin Irrigation (Irrigation en bassin) : L'eau est distribuée dans de petits bassins délimités par des levées ou des remblais. Chaque bassin reçoit une quantité d'eau contrôlée et est souvent utilisé pour les cultures ligneuses.
- Border Irrigation (Irrigation en bordure) : Cette méthode utilise des bandes de terrain légèrement inclinées pour diriger l'eau entre des bords ou des levées. Elle est couramment utilisée pour irriguer des cultures comme le coton, le maïs ou le blé.

- Irrigation par aspersion : Des tuyaux répartissent l'eau sous forme de pluie artificielle sur les cultures. Cette méthode est plus efficace que l'irrigation de surface et permet une meilleure uniformité de l'application de l'eau.
- Irrigation goutte-à-goutte : L'eau est administrée directement aux racines des plantes par des tuyaux perforés. Cette méthode est très efficace car elle minimise les pertes par évaporation et permet une irrigation ciblée.
- Irrigation sous pression (micro-irrigation) : Combine l'irrigation par aspersion et goutte-à-goutte pour améliorer l'efficacité.



Figure 39. Irrigation de surface par inondation et par régole



Figure 40. Irrigation de surface par aspersion et goutte à goutte

B.3.3.1.2 Avantages et Inconvénients de l'Irrigation de Surface

Les Avantages (Rockström, Lannerstad, & Falkenmark, 2007):

- Faible coût d'installation : L'irrigation de surface nécessite généralement moins d'investissement initial en comparaison avec des systèmes comme l'irrigation goutte-à-goutte ou par aspersion.
- Adaptabilité : Cette méthode peut être utilisée sur une large gamme de sols et de cultures, y compris dans les régions à faible infrastructure.
- Simplicité d'utilisation : Les systèmes d'irrigation de surface sont relativement simples à concevoir et à maintenir.
- Utilisation de l'eau : L'irrigation de surface permet de récupérer l'eau excédentaire, qui peut être réutilisée pour d'autres cycles de culture.

Les Inconvénients :

- Efficacité d'irrigation faible : L'un des principaux inconvénients de l'irrigation de surface est sa faible efficacité en termes de gestion de l'eau, en raison des pertes par évaporation, infiltration excessive et drainage profond. Cela peut conduire à des gaspillages d'eau et à une mauvaise répartition de l'eau dans le champ.
- Dépendance aux conditions de terrain : L'efficacité de l'irrigation de surface dépend de la topographie du terrain. Les champs plats et nivelés sont plus faciles à irriguer de manière uniforme.
- Érosion et salinisation : Une gestion inadéquate de l'irrigation de surface peut entraîner des problèmes d'érosion du sol et de salinisation, en particulier dans les zones où l'eau d'irrigation est pauvre en qualité.

B.3.4. Gestion de l'Eau de Pluie

La gestion de l'eau de pluie est un aspect essentiel dans l'agriculture, l'urbanisme et la conservation des ressources naturelles. Une gestion efficace permet de maximiser l'utilisation de cette ressource tout en prévenant les inondations, l'érosion et la pollution. Voici une explication détaillée de la gestion de l'eau de pluie, notamment dans un contexte agricole et environnemental (Biazin, Sterk, Temesgen, Abdulkedir, & Stroosnijder, 2012).

B.3.4.1 Collecte de l'Eau de Pluie

La collecte de l'eau de pluie consiste à capter l'eau qui tombe sur une surface pour la stocker et l'utiliser à des fins agricoles, domestiques ou industrielles. Cela peut se faire à travers différentes infrastructures :

- Récupérateurs d'eau de pluie : Ces systèmes de collecte sont souvent installés sur les toits des bâtiments pour capter l'eau qui y tombe. L'eau est ensuite dirigée vers des réservoirs ou des citernes.
- Bassins de rétention : Ce sont des structures de stockage en plein air qui permettent de recueillir l'eau de pluie sur de grandes surfaces. Ces bassins peuvent être utilisés pour irriguer les cultures pendant les périodes sèches.

B.3.4.2 Infiltration et Réutilisation de l'Eau de Pluie

L'infiltration de l'eau dans le sol est un aspect crucial de la gestion des eaux pluviales. Elle permet de recharger les nappes phréatiques et de maintenir un bon équilibre hydrique des sols. Voici des pratiques pour favoriser l'infiltration de l'eau :

- Cultures de couverture : Les plantes comme les légumineuses ou les graminées permettent de réduire le ruissellement et favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol en maintenant la structure du sol intacte.
- Techniques de culture en terrasse : Ces techniques, adaptées aux terrains en pente, permettent de retenir l'eau et d'éviter les pertes par ruissellement.
- Fossés et tranchées de percolation : Ces structures sont conçues pour diriger l'eau de pluie vers les zones de stockage ou pour aider l'eau à s'infiltrer dans le sol.



Figure 41. Technique d'infiltration et utilisation des eaux de pluie

B.3.4.3 Gestion de l'Eau de Pluie pour l'Irrigation

L'irrigation est une application importante dans la gestion de l'eau de pluie. Elle permet d'utiliser les précipitations pour fournir de l'eau aux cultures pendant les périodes de sécheresse. Les systèmes modernes d'irrigation peuvent inclure :

- Irrigation goutte-à-goutte : Ce système permet une distribution contrôlée et efficace de l'eau, ce qui minimise les pertes dues à l'évaporation et permet d'utiliser l'eau de pluie collectée de manière optimale.
- Irrigation par aspersion : Bien que moins précise que l'irrigation goutte-à-goutte, cette méthode est utile pour irriguer de grandes surfaces et peut être alimentée par des réservoirs d'eau de pluie.



Figure 42. Gestion de l'eau de pluie pour des fins agricole

B.3.4.4 Gestion des Risques d'Inondation et d'Érosion

Lors de fortes pluies, le risque d'inondation et d'érosion du sol augmente. Pour éviter ces problèmes, plusieurs stratégies peuvent être mises en place :

- Zones de rétention : La création de zones où l'eau de pluie peut être stockée et absorbée lentement permet de réduire le risque de ruissellement excessif et d'inondations.
- Aménagement paysager : L'usage de talus, de fossés et de murs de soutènement peut aider à contrôler le flux d'eau et à réduire l'érosion des sols.

- Couverture végétale : Maintenir une couverture végétale sur le sol, comme les herbes ou les cultures intercalaires, est une excellente méthode pour réduire l'érosion et améliorer la qualité de l'eau qui s'infiltré dans le sol.

B.3.4.5 Préservation de la Qualité de l'Eau

La gestion de l'eau de pluie inclut également la préservation de la qualité de l'eau. En milieu urbain, les eaux de pluie peuvent être contaminées par des polluants comme les produits chimiques, les huiles ou les métaux lourds. Des solutions pour préserver la qualité de l'eau incluent :

- Filtration et traitement : Les systèmes de collecte d'eau de pluie peuvent être équipés de filtres pour éliminer les impuretés avant d'utiliser l'eau pour l'irrigation ou la consommation.
- Bassin de décantation : Dans les zones agricoles et urbaines, des bassins de décantation permettent de laisser les particules solides se déposer avant que l'eau ne soit utilisée.

B.3.4.6 Technologies d'Irrigation Intelligente

L'intégration des technologies intelligentes dans l'irrigation est une évolution majeure qui permet de mieux gérer l'eau en agriculture, en améliorant l'efficacité de l'irrigation et en réduisant les pertes d'eau. Les systèmes d'irrigation intelligents utilisent des technologies avancées pour adapter les besoins en eau des cultures aux conditions spécifiques du sol, du climat et des plantes. Voici quelques-unes des technologies clés utilisées dans cette approche (Arbat & Masseroni, 2024) :

- Capteurs d'humidité du sol : Ces capteurs mesurent en temps réel la quantité d'eau présente dans le sol. Ils permettent de savoir exactement quand il est nécessaire d'irriguer. Lorsque le sol devient trop sec, les capteurs envoient un signal à un système automatisé pour démarrer l'irrigation, ce qui évite les gaspillages d'eau en arrosant seulement lorsque c'est nécessaire.
- Systèmes de gestion automatisée : Ces systèmes utilisent des plateformes connectées (souvent basées sur le cloud) pour collecter et analyser les données provenant des capteurs, des prévisions météorologiques et des paramètres agricoles. Grâce à ces informations, le système peut ajuster automatiquement les apports en eau selon les besoins réels des cultures. Par exemple, si des pluies sont prévues, l'irrigation peut être réduite ou annulée.

- Données météorologiques et algorithmes prédictifs : L'intégration de données météorologiques (telles que la température, l'humidité de l'air et les prévisions de pluie) permet d'adapter l'irrigation à court terme. Des algorithmes prédictifs utilisent ces données pour estimer les besoins en eau sur les jours à venir et ajuster le calendrier d'irrigation. Cela garantit que les plantes reçoivent la quantité d'eau optimale, réduisant ainsi les risques de sur-irrigation ou de sous-irrigation.
- Systèmes d'irrigation goutte-à-goutte intelligents : Ces systèmes distribuent l'eau directement à la racine des plantes de manière précise, ce qui réduit le gaspillage d'eau dû à l'évaporation ou au ruissellement. L'intégration de la technologie permet également de moduler l'intensité de l'irrigation en fonction de la météo, de la croissance des plantes et de l'humidité du sol.
- Drones et imagerie satellite : Les drones et les images satellite permettent de suivre la santé des cultures et d'identifier les zones du champ qui nécessitent une irrigation supplémentaire. Grâce à ces technologies, les agriculteurs peuvent localiser les zones ayant un besoin accru en eau, ce qui permet de cibler l'irrigation et d'éviter les gaspillages.

L'ensemble de ces technologies constitue une approche de gestion de l'eau plus précise, moins gourmande en ressources et plus respectueuse de l'environnement. Grâce à l'irrigation intelligente, l'agriculture devient plus durable, avec une meilleure conservation des ressources en eau, ce qui est particulièrement important dans les régions confrontées à la rareté de cette ressource.



Figure 43. Gestion de l'irrigation par l'intégration de l'intelligence artificielle

Références

- Abirami , R., Jothimani, S., & Leninraja, D. (2023, Octobre 02). Mechanism of Redox Reaction in Soil Chemistry. (B. Forum, Éd.) *Biological Forum – An International Journal*, 15(10), 1313-1321. Récupéré sur <https://www.researchtrend.net/bfij/pdf/Mechanism-of-Redox-Reaction-in-Soil-Chemistry-Abirami-R-242.pdf>
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. (FAO, Éd.) Rome, Italy, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Récupéré sur <https://www.fao.org/4/x0490e/x0490e00.htm#Contents>
- Ankeny, M. (1992). *Methods and Theory for Unconfined Infiltration Measurements*. (W. D. G. Clarke Topp, Éd.) New Yourk, USA: SSSA Special Publications. doi:DOI:10.2136/sssaspecpub30
- Arbat, G., & Masseroni, D. (2024, Janoury 30). The Use and Management of Agricultural Irrigation Systems and Technologies. (MDPI, Éd.) *Agriculture*, 14(2), 1-5. doi:<https://doi.org/10.3390/agriculture14020236>
- Archambeaud , M., & Thomas, F. (2023). *Les sols agricoles: comprendre, observer, diagnostiquer*. (É. F. agricole, Éd.) Paris, France, France: Éditions France agricole. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Les_sols_agricoles/YL0R0AEACAAJ?hl=fr
- Archambeaud, M., & Thomas, F. (2022). *Les sols Agricoles*. (E. F. Agricole, Éd.) Paris, France: France Agricole. Récupéré sur <https://excerpts.numilog.com/books/9782855574585.pdf>
- Aubert, G., Ollat, C., & Pinta, M. (1954). *Méthodes d'analyses utilisées actuellementaux laboratoire des sols de l'IDERT*. La 2e Conférence Inter africaine des Sols., Léopoldville: France d'outre-Mer. Récupéré sur https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_08-09/11213.pdf

- Bachelier, G. (1963). *La vie animale dans les sols*. (O. OUTRE-MER, Éd.) Paris, France: ORSTOM. Récupéré sur https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers14-07/15093.pdf
- Bachelier, G. (1978). *LA faune des sols so, écologie et son action*. (O.R.S.T.O.M., Éd.) Paris, France: O.R.S.T.O.M. Récupéré sur https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Idt/09691.pdf
- Baize, D. (2009). *Référentiel pédologique 2008*. Paris: Quae. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/R%C3%A9f%C3%A9rentiel_p%C3%A9dologique_2008/AXUjCwAAQBAJ?hl=fr
- Baize, D. (2021). *Naissance et évolution des sols La pédogenèse expliquée simplement* (Vol. 1s édition). (É. Quae, Éd.) paris, Frances: Éditions Quae. Récupéré sur <https://www.quae.com/produit/1669/9782759232659/naissance-et-evolution-des-sols>
- Baize, D., & Jabiol, B. (1995). *Guide pour la description des sols*. (INRA, Éd.) Paris, France, France: Quae. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Guide_pour_la_description_des_sols/N2MbjRNILLUC?hl=fr&gbpv=0
- Bardgett, R. (2010). *The Biology of Soil: A community and ecosystem approach*. (O. U. Press, Éd.) Oxford, UKA, UKA: Oxford University Press. doi:doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198525035.001.0001
- Barker, A., & Pilbeam, D. (2015). *Handbook of Plant nutrition* (Vol. 2édition). (T. & Francis, Éd.) Nez Yourk, USA: CRC Press. Récupéré sur https://home.czu.cz/storage/737/65060_Books-in-soils-plants-and-the-environment-117.-Barker-Allen-V.-Handbook-of-plant-nutrition-Taylor-et-Francis-2015-.pdf
- Bates, B., Kundzewicz, Z., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). *e changement climatique et l'eau*. (GIEC, Éd.) Paris, France: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Récupéré sur <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-fr.pdf>
- Bekele, M., & Getaneh, S. (2022). Function of Microorganisms on Soil Health Maintenance:A Review Article. (DOAJ, Éd.) *International Journal of Advanced Research in Biological Sciences*, 9(4), 82-93. doi:DOI: 10.22192/ijarbs

- Biazin, B., Sterk, G., Temesgen, M., Abdulkedir, A., & Stroosnijder, L. (2012). Rainwater harvesting and management in rainfed agricultural systems in sub-Saharan Africa – A review. (Elsevier, Éd.) *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 47(48), 139-151. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.08.015>
- Bonnefont, J.-C. (2003). *Eau et environnement: Tunisie et milieux méditerranéens*. (2003). France: ENS Éditions. (ENS, Éd.) Lyon, France: Collection Sociétés. doi:<https://doi.org/10.4000/rge.2330>
- Bot, A., & Benites, J. (2005). *The Importance of Soil Organic Matter: Key to Drought-resistant Soil and Sustained Food Production*. (FAO, Éd.) Rome, Italy, Italy: FAO. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/The_Importance_of_Soil_Organic_Matter/dJe5-pmmjaAC?hl=fr&gbpv=0
- Bougeois, M., Coquillard, E., Cournar, M., & Fassino, C. (2024, Juin 23). *La fertilité physique*. (M. ARCHAMBEAUD, Éditeur, & S. D. TOURDONNET, Producteur) Récupéré sur Supagro: https://www.supagro.fr/ress-pepites/sol/co/2_FertiPhy.html
- Brady, N., & Weil, R. (2008). *The Nature and Properties of Soils*. (P. Hall, Éd.) New Yourk, United Kingdom, United Kingdom: l'Université de Virginie. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/_/73NFAAAAAYAAJ?hl=fr&sa=X&ved=2ahUKEWi8ztrl-NiKAxU4K_sDHc9ZI0AQ7_IDegQIDxAC
- Brady, N., & Weil, R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (Vol. 15 Edition). (Pearson, Éd.) New Yourk, USA: Pearson. Récupéré sur <https://www.amazon.com/Nature-Properties-Soils-15th/dp/0133254488>
- Brown, S., Biswas, A., Caron, J., Dyck, M., & Si, B. (2024, Jun 22). *Introduction à la science du sol : de la théorie à la pratique en sols canadiens*. (C. ©. Science, Éditeur, C. ©. Science, Producteur, & University of Saskatchewan) Consulté le 2024, sur La physique du sol: <https://openpress.usask.ca/soilsciencefrench/chapter/soil-physics/>
- Bryssine, G. (1986). *CONTRIBUTION A L'ETUDE DU CALCAIRE DANS LES SOLS MAROCAINS*. Paris, france, France: Awamia. Récupéré sur <https://www.inra.org.ma/sites/default/files/02606.pdf>

- Calvet, R. (2003). *Le sol: propriétés et fonctions. Constitution, structure, phénomènes aux interfaces*. (E. F. Agricole, Éd.) Paris, France, France: France Agricole. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Le_sol/stjPwnBDH-EC?hl=fr&gbpv=0
- Calvet, R., Chenu, C., & Houot, S. (2011). *Les matières organiques des sols: Rôles agronomiques et environnementaux*. (E. F. Agricole, Éd.) Paris, France, France: Editions France Agricole. Récupéré sur <https://hal.science/hal-01192274>
- Chukhrov , F., & Gorshkov, A. (1981). Iron and manganese oxide minerals in soils . (T. o. Edinburgh:, Éd.) *Earth Sciences.*, 72(3), 195-200. doi:doi:10.1017/S0263593300009998
- Clive, A., & Arancon, N. (2022). *Biology and Ecology of Earthworms*. (Springer, Éd.) New Yourk, USA: Springer New York, NY. doi:<https://doi.org/10.1007/978-0-387-74943-3>
- Cluzeau , D., & Peres, G. (2004, Mai). L'importance de la biodiversité du sol : e cas du ver de terre. (r. TCS, Éd.) *revue TCS (techniques culturales simplifiées)*, 27, 14-22.
- Comstock, J. (2002, February). Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration. (O. Academic, Éd.) *Journal of Experimental Botany.*, 53(367), 195–200. doi:<https://doi.org/10.1093/jexbot/53.367.195>
- Corwin, D., & Lesch, S. (20003, Mai 01). Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture Theory, Principles, and Guidelines. (ASA, Éd.) *Agronomy Journal*, 95(3), 455-471. doi:<https://doi.org/10.2134/agronj2003.4550>
- Corwin, D., & Yemoto, K. (2017, Feb 15). Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. (©. S. America, Éd.) *Methods of Soil Analysis*, 2, 1-16. doi:doi:10.2136/msa2015.0039
- Day, P. (1965). *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling* (Vol. Parte 1). (b. t. Copyright © 1965, Éd., & P. Day, Trad.) New Yourk, USA, USA: Copyright © 1965, by the American Society of Agronomy, Inc. doi:DOI:10.2134/agronmonogr9.1
- Denier-Pasquier, F. (2013). *LA GESTION ET L'USAGE DE L'EAU EN AGRICULTURE Avis du Conseil économique, social et environnemental*. (J. OFFICIELS, Éd.) Paris, France, France: Les éditions des JOURNAUX OFFICIELS. Récupéré sur

https://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2013/2013_11_gestion_eau_agriculture.pdf

Denis, B., Odile, D., & Guy, R. (2013). *Les sols et leurs structures: Observations à différentes échelles. France: Quae.* Paris, France, France: Quae. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Les_sols_et_leurs_structures/zfZaAgAAQBAJ?hl=fr&gbpv=0

Denis, B., Odile, D., & Guy, R. (2013). *Les sols et leurs structures: Observations à différentes échelles.* (Quae, Éd.) Paris, France, France: Quae. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Les_sols_et_leurs_structures/zfZaAgAAQBAJ?hl=fr&gbpv=0

Djama, Z. A., Ersahin, S., & Sùnal Kava, S. (2023, February 27). Evaluation of Soil Color and Soil Fertility Relations on Cultivated Semi-Arid Sloping Landscapes. (G. University, Éd.) *Journal of Agricultural Faculty of Gaziosmanpasa University*, 40(1), 19-25. doi:doi:10.55507/gopzfd.1213097

Doran, W., Coleman, D., Bezdicek, D., & Stewar, B. (1994). *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment.* Nez Yourk, USA, USA: Copyright © 1994 by the Soil Science Society of America, Inc. Récupéré sur <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.2136/sssaspecpub35>

Duchaufour, P. (1997). *Abrégé de pédologie: sol, végétation, environnement.* (Masson., Éd.) Rome, Italie, Italie: Masson. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Abr%C3%A9g%C3%A9_de_p%C3%A9dologie/FJ45AAAACAAJ?hl=fr

Duchaufour, P., Faivre, P., & Poulénard, J. (2024). *Introduction à la science du sol - 8e édition Sol, végétation, environnement.* (Dunod, Éd.) Paris, France: Dunod. Récupéré sur <http://www.jijel-bib.com/livres/francais/pdf-scterre/st12.pdf>

Eck, H., Mathers, A., & Musick, J. (1987). Plant water stress at various growth stages and growth and yield of soybeans,. (Elsevier, Éd.) *Field Crops Research*, 17(1), 1-16. doi:[https://doi.org/10.1016/0378-4290\(87\)90077-3](https://doi.org/10.1016/0378-4290(87)90077-3).

Einhorn, J., & Peterson, E. (2009). *Water and Agriculture Implications for Development and Growth Essays from the CSIS and SAIS Year of Water Conference.* Washington, USA,

- USA: CSIS. Récupéré sur <https://nicholasinstitute.duke.edu/sites/default/files/publications/water-and-agriculture-implications-for-development-and-growth-paper.pdf>
- Eldin, M. (1989). *Le Risque en agriculture*. (P. M. Michel Eldin, Éd.) Paris, France, France: Editions de l'ORSTOM. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Le_Risque_en_agriculture/9A4EOFs9N10C?hl=fr&gbpv=0
- FAO. (1994). *Directives pour la description des sols*. (Italie: ISRIC., Éd.) Rome, Italie: FAO. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Directives_pour_la_description_des_sols/VBxE xJRKX-wC?hl=fr&gbpv=0
- FAO. (2013). *Faire face à la pénurie d'eau : Un cadre d'action pour l'agriculture et la sécurité alimentaire*. Rome: FAO. Récupéré sur <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e44dcef6-96a0-4214-b18d-1bb6ad499739/content>
- FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Technical Summary*. (FAO, Éd.) Rome: FAO. Récupéré sur https://www.fao.org/fileadmin/user_upload/newsroom/docs/FAO-world-soils-report-SUMMARY.pdf
- FAO. (2015). *World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. (FAO, Éd.) Rome, Italy, italy: FAO. Récupéré sur <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/bcdecec7-f45f-4dc5-beb1-97022d29fab4/content>
- FAO. (2023). *L'État des ressources en terre et en eau pour l'alimentation et l'agriculture*. Caire, Egypte: FAO. Récupéré sur <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e40eada2-6282-4976-b2e6-d7307927aa4e/content>
- FAO. (2024, Juin 12). *Portail d'information sur les sols*. (FAO, Éditeur, FAO, Producteur, & FAO) Récupéré sur Gestion des sols sableux: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-management/gestion-des-sols-a-problemes/gestion-des-sols-sableux/fr/>

- FAO. (2024). *The State of Food and Agriculture Value-driven transformation of agrifood systems*. (FAO, Éd.) Rome, Italy: FAO. Récupéré sur <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b49c8100-3e00-4cc6-b617-226edd7a9662/content>
- Fritz, J., Lauer, F., Wilkenine, A., Masson, P., & Peth, S. (2021, Mai 21). Aggregate stability and visual evaluation of soil structure in biodynamic cultivation of Burgundy vineyard soils. (T. & Francis, Éd.) *Biological Agriculture & Horticulture*, 37(3), 168–182. doi:<https://doi.org/10.1080/01448765.2021.1929480>
- Gebhardt, A., Occhietti, S., & Fechner, K. (2014). Grandes phases de pédogenèse, d'érosion et d'anthropisation des sols au cours de la seconde moitié de l'Holocène en Lorraine (France). (O. Journals, Éd.) *Archeo Sciences*, 7-29. doi:<https://doi.org/10.4000/archeosciences.4113>
- Ghidey, F., & Alberts, E. (1997). Impact of soil aggregate stability on soil erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 61(5), 1459-1465.
- GIEC. (2018). *Summary for Policymakers. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the*. Genève: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Récupéré sur www.ipcc.ch/sr15/chapter/spm/
- Gleick, P. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. (1. édition, Éd.) London, UKA: Oxford University Press. Récupéré sur <https://www.amazon.com/Water-Crisis-Guide-Worlds-Resources/dp/0195076281>
- Guigaz, M. (2002). *Mémento de l'agronome*. (C. d. internationale, Éd.) Paris, France, France: CIRAD-GRET. Récupéré sur https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Agriculture/Memento-de-l-Agronome_CIRAD.pdf
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations*. (A. Press, Éd.) Paris, France, France: Academic Press. Récupéré sur <https://shop.elsevier.com/books/environmental-soil-physics/hillel/978-0-12-348525-0>
- Hillel, D. (2003). *Environmental Soil Physics*,. (Elsevier, Éd.) Birline, Germany: Copyright © 2003 Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348655-4.X5000-X>

- IPCC. (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. (Cambridge, Éd.) London, UK, UK: Cambridge University Press. doi:<https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Jeandel, C., & Mosseri, R. (2017). *Le climat à découvert. France*. (R. M. Catherine Jeandel, Éd.) Paris, France: CNRS Éditions OpenEdition. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Le_climat_%C3%A0_d%C3%A9couvert/TJM8DwAAQBAJ?hl=fr
- Jenny, H. (1980). *The Soil Resource; Origin and Behavior*. (N. Springer New York, Éd.) New Yourk, USA, USA: Springer New York, NY. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6112-4>
- Jenny, H. (1980). *The soil resources : origin and behavior*. New Yourk, Birlin, Germany: Springer-Verlag. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4612-6112-4>
- Jia, N., Li, L., Guo, H., & Xie , M. (2024, Novembre 28). Important role of Fe oxides in global soil carbon stabilization and stocks. (N. Communications, Éd.) *Nat Commun*, 15(10318), 1-11. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-024-54832-8>
- Johnnson, A. (1961). *A Field Method for Measurement of Infiltration*. (D. Dallas L. Peck, Éd.) Washington, USA, USA: U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Récupéré sur <https://pubs.usgs.gov/wsp/1544f/report.pdf>
- Julien, J.-L., Bourrié, G., Bruand, A., Feller, C., Morlon, P., Oort, F., & Tessier, D. (2023, Septe,bre 28). Histoire detrois concepts du sol mal maîtrisés : le pH du sol, les cations échangeables et la capacité d'échangeationique. (H. Id., Éd.) *Étude et Gestion des Sols*, 30(insu-04220866f), 365-381. Récupéré sur <https://insu.hal.science/insu-04220866/document>
- Kalyani, N. L., & Prakash, K. B. (2022). Soil Color as a Measurement for Estimation of Fertility using Deep Learning Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(5), 305-310. Récupéré sur https://thesai.org/Downloads/Volume13No5/Paper_36-Soil_Color_as_a_Measurement_for_Estimation_of_Fertility.pdf
- Klute, A. (1986). *Methods of Soil Analysis Part 1, Physical and Mineralogical Methods Number 9 (Part I) Agronomy*. Madison, USA, USA: American Society of Agronomy USA. Récupéré sur

https://www.google.dz/books/edition/_/Zx8RxQEACAAJ?hl=fr&sa=X&ved=2ahUK EwiRr9aT-9iKAXuAXEEAHVeDF8oQ8fIDegQIEBAD

Kramer, P., & Boyer, J. (1995). *Water relations of plants and soils*. (U. Delaware, Éd.) New Yourk, USA: Academic Press, Inc. Récupéré sur <https://udspace.udel.edu/server/api/core/bitstreams/6d0d77e4-ccaf-4d3b-9861-f7d2ea872fb9/content>

Kundzewicz, Z. (2013, Janaury 24). Global freshwater resources for sustainable development. (E. & Hydrobiology, Éd.) *Ecohydrology & Hydrobiology*, 7(2), 125-135. doi:[https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70178-7](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70178-7)

Kutílek, M., & Nielsen, D. (1994). *Soil Hydrology*. (1. Catena-Verlag, Éd.) Michigan, USA, USA: Catena-Verlag, 1994. Récupéré sur https://books.google.dz/books/about/Soil_Hydrology.html?id=fu9HwgEACAAJ&redir_esc=y

Lal, R. (2004, Jun 11). Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. (Science, Éd.) *Science*, 304(5677), 1623-1627. doi:DOI: 10.1126/science.1097396

Lal, R., & Shukla, M. (2004). *Principles of soil physics*. (University Ohio, Éd.) New Yourak, USA: MARCEL DEKKER, INC. Récupéré sur <https://dewagumay.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/12/principles-of-soil-physics.pdf>

Lal, R., & Stewart, B. (2012). *Soil Water and Agronomic Productivity* (éd. 1st). Ohio , USA: CRC Press. Consulté le July 5, 2012, sur https://www.routledge.com/Soil-Water-and-Agronomic-Productivity/Lal-Stewart/p/book/9781439850794?srsId=AfmBOorJaf44k0_aHYCM23-dql45PmMvivyC0xjYWgWDvZ2fsRMQNnhOY

Leenhardt, D., Voltz , M., & Barretea, O. (2020). *L'eau en milieu agricole Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. (Quae, Éd.) Versailles Cedex, France, France: Quae. Récupéré sur <file:///C:/Users/AOUIDANE/Downloads/9782759231249.pdf>

Leenhardt, D., Voltz, M., & Barretea, O. (2020). *L'eau en milieu agricole Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. (© Éditions Quæ, Éd.) Versailles, France:

- Quæ. Récupéré sur
[file:///C:/Users/AOUIDANE/Downloads/9782759231249%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/AOUIDANE/Downloads/9782759231249%20(2).pdf)
- Leenhardt, D., Voltz, M., & Barreteau, O. (2020). *L'eau en milieu agricole: Outils et méthodes pour une gestion intégrée et territoriale*. (M. V. Delphine Leenhardt, Éd.) Paris, France, France: Quæ. Récupéré sur
https://www.google.dz/books/edition/L_eau_en_milieu_agricole/zIrrDwAAQBAJ?hl=fr
- Legros , J.-P. (1996). *Cartographies des sols: de l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Suisse: Presses polytechniques et universitaires romandes. (P. p. romandes, Éd.) Lousane, Sowise: Presses polytechniques et universitaires romandes. Récupéré sur
https://www.google.dz/books/edition/Cartographies_des_sols/MiONzDc-jnQC?hl=fr&gbpv=0
- Liu, A., Hamel, C., Hamilton, R., & Smith, D. (2000, June). Mycorrhizae formation and nutrient uptake of new corn (*Zea mays* L.) hybrids with extreme canopy and leaf architecture as influenced by soil N and P levels. (S. Nature, Éd.) *Plant and soil*, 221, 157–166. doi:doi.org/10.1023/A:1004777821422
- Maignibn, R. (1969). *manuel de prospection pédologique*. (O. R. M., Éd.) Paris, France: O. R. S. T. O. M. Récupéré sur https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/Idt/13826.pdf
- Marschner, P. (2011). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (Vol. 3rd Edition,). (ELSEVIER, Éd.) London, UK, UK: Academic Press,. Récupéré sur
https://home.czu.cz/storage/737/65060_Mineral-Nutrition-of-higher-plants-Marschner-2012.pdf
- Mathieu , C. (2009). *Les principaux sols du monde*. (Lavoisier., Éd.) Paris, France, France: Lavoisier. Récupéré sur
https://www.google.dz/books/edition/Les_principaux_sols_du_monde/rUTvAQAAQBAJ?hl=fr&gbpv=0
- Mathieu , C., & Lozet, J. (2011). *Dictionnaire encyclopédique de science du sol: avec index anglais-français*. (T. & Lavoisier., Éd.) London, Royaume-Uni, Royaume-Uni: Tec & Doc Lavoisier. Récupéré sur

https://www.google.dz/books/edition/Dictionnaire_encyclopedique_de_sciences/WoUZ9LnjiMQC?hl=fr&gbpv=0

Mathieu, C., & Lozet, J. (2011). *Dictionnaire encyclopédique de science du sol (5e ed.)*. France: Lavoisier. (Lavoisier., Éd.) Paris, France, France: Lavoisier. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Dictionnaire_encyclopedique_de_sciences/6Ld2GA06XgwC?hl=fr&gbpv=0

Megh, R., Goyal, S., & Gupta, K. (2021). *Soil Salinity Management in Agriculture: Technological Advances and Applications*. (A. A. Press., Éd.) New Yourk, USA, USA: Apple Academic Press. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Soil_Salinity_Management_in_Agriculture/JpA8zgEACAAJ?hl=fr

Mekonnen, M., & Hoekstra, A. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products, *Ecosystems*, 15(3), 401–415. Récupéré sur doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8

Milly, P., Dunne, K., & Vecchia, A. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347–350. Récupéré sur doi.org/10.1038/nature04312

Monteith, J. (1965). Evaporation and the Environment. (C. U. Cambridge, Éd.) *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205–234. Récupéré sur <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaporation-and-environment.-Monteith/428f880c29b7af69e305a2bf73e425dfb9d14ec8>

Munsell, A. (1954). *Munsell Soil Color Charts*. New York: Macbeth Division of Kollmorgen Instruments Corporation. Récupéré sur <https://fr.scribd.com/document/473724184/Munsell-Color-Chart-2009>

Musy, A., & Soutter, M. (1991). *Physique du sol*. (U. Romand, Éd.) Romand, Suisse: EPFL Press. Récupéré sur https://books.google.dz/books/about/Physique_du_sol.html?hl=fr&id=eGuqqoyF2bgC&redir_esc=y

Nawaz, M., Bourrié, G., & Gul, S. (2014). FACTORS AFFECTING REDOX REACTIONS IN HYDROMORPHIC SOILS. A REVIEW. *Pak. J. Agri. Sci.*, 51(3), 515-521.

- Récupéré sur https://www.researchgate.net/publication/287247154_Factors_affecting_redox_reactions_in_hydromorphic_soils_A_review
- Nelson, D., & Cox, M. (2008). *Lehninger Principales of Biochemistry*. (7. édition, Éd.) New Yourk, USA: W.H. Freeman. Récupéré sur <http://aulanni.lecture.ub.ac.id/files/2012/01/15616949-Lehninger-Principles-of-Biochemistry-1-copy.pdf>
- Nobel, P. (2009). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. (Elsevier, Éd.) California, USA: Copyright © 2009 Elsevier Inc. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374143-1.X0001-4>
- Nyle, C., & Brady, R. (2014). *Elements of the Nature and Properties of Soils*. (P. E. Limited, Éd.) New Yourk, USA, USA: Pearson. Récupéré sur https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781292052083_A24582024/preview-9781292052083_A24582024.pdf
- Oades, J. (1984). Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil*, 76, 319–337. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02205590>
- Ogwu, M., Izah, S., Dessureault-Rompré, J., & Gasparatos, D. (2024). *Sustainable Soil Systems in Global South*. sangapore, USA, USA: Springer Singapore. doi:<https://doi.org/10.1007/978-981-97-5276-8>
- Oki, T., & Kanae, S. (2006, AUGUST 25). Global Hydrological Cycles and World Water Resources. *SCIENCE*, 313, 1062-1072. Récupéré sur <https://www.sas.rochester.edu/ees/ees101/PDFs/1068.pdf>
- Pagliai, M., Vignozzi, N., & Pellegrini, S. (2004., Decembre 22). Soil structure and the effect of management practices. (ELSEVIER, Éd.) *Soil and Tillage Research*, 79(2), 131-143. doi:<https://doi.org/10.1016/j.still.2004.07.002>
- Paul, E. (2014). *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. (2014). Pays-Bas: Elsevier Science. (E. Science, Éd.) Berlin, Germany, Germany: Elsevier Science. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Soil_Microbiology_Ecology_and_Biochemist/gDnLAAwAAQBAJ?hl=fr&gbpv=0

- Pédrot, M. (2009). *Colloïdes et compositions élémentaires des solutions de sols*. Géosciences Rennes, Sciences de la Matière . Rennes: UNIVERSITÉ de RENNES. Récupéré sur <https://theses.hal.science/tel-00533848/file/these-PEDROT-M-136.pdf>
- Quastel, J. (1955). Soil Metabolism. *Proc. Roy. Soc., sér. B*, 143(911), 159-17. Récupéré sur <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.pp.16.060165.001245>
- Reid, K., Bruulsema, T., Cowan, D., Kessel, C., Peters, D., & Verhallen, A. (2006). *Soil Fertility Handbook*. (O. Keith Reid, Éd.) Toronto, Canada, Canada: © Queen's Printer for Ontario. Récupéré sur https://www.researchgate.net/profile/Tony-Vyn/publication/299665015_Soil_Fertility_Handbook/links/625ef256709c5c2adb87a48f/Soil-Fertility-Handbook.pdf
- Robson, A. (1989). *Soil acidity and plant growth*. (A. P. AUSTRALIA, Éd.) London, UK: ACADEMIC PRESS. Récupéré sur https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780323156226_A24400355/preview-9780323156226_A24400355.pdf
- Rockström, J., Lannerstad, M., & Falkenmark, M. (2007, April 10). Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. (W. A. Jury, Éd.) *PNAS*, 104(15), 6253-6260. doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.0605739104>
- Roose, É. (2018). *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens Contribution à l'agroécologie*. (I. Éditions., Éd.) Paris, France, France: IRD Éditions. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Restauration_de_la_productivit%C3%A9_des_sol/gYZ7DwAAQBAJ?hl=fr
- Roose, E. (2018). *Restauration de la productivité des sols tropicaux et méditerranéens: Contribution à l'agroécologie*. (I. Éditions., Éd.) Paris, France, France: IRD Éditions. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Restauration_de_la_productivit%C3%A9_des_sol/gYZ7DwAAQBAJ?hl=fr
- Roose, E., Sabir, M., & Laouina, A. (2010). *Gestion durable des eaux et des sols au Maroc: Valorisation des techniques traditionnelles méditerranéennes*. (I. Éditions, Éd.) Paris, France, France: IRD Éditions. Récupéré sur

https://www.google.dz/books/edition/Gestion_durable_des_eaux_et_des_sols_au/ooMUtvCHxj8C?hl=fr&gbpv=0

- Ruellan, A., & Barral, H. (1983). *Compte-rendu des journées d'études de l'O.R.S.T.O.M.* (Vol. 2e Edition). Paris, France, France: OTER-Mer. Récupéré sur https://www.decitre.fr/ebooks/compte-rendu-des-journees-d-etudes-de-l-o-r-s-t-o-m-9782307381907_9782307381907_1.html
- Schaetzl , R., & Anderson, S. (2005). *Pedoturbation. In: Soils: Genesis and Geomorphology.* Cambridge: Cambridge University Press. Récupéré sur <https://www.cambridge.org/core/books/abs/soils/pedoturbation/C2718509AA67E5D2BF78229DBE60A21B>
- Schaetzl , R., Mikesell , L., & Velbel, M. (2006). Soil characteristics related to weathering and pedogenesis across a geomorphic surface of uniform age in Michigan. (T. & Francis, Éd.) *Physical Geography*, 27(2), 170-188. doi:<https://doi.org/10.2747/0272-3646.27.2.170>
- Schofield, R., & Taylor, M. (1955). The Determination of Electrical Conductivity of Soil Solutions. (S. S. America, Éd.) *Soil Science Society of America Journal*, 19(4), 201-206.
- Shah , M., Waseem, M., Iqbal, M., Nabi, G., Atiq, M., Tariq, R., . . . Abbas , K. (2024, July 18). Improving Irrigation Performance of Raised Bed Furrow Using WinSRFR Model. *Water Conserv Sci Eng*, 9(44), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1007/s41101-024-00266-8>
- Shaheb , M., Venkatesh, R., & Shearer, S. (2021, October 12). Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *J. Biosyst. Eng.*, 46, 417–439. doi: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- Siebert, S., Henrichs, K., Frenken, K., & Burke, J. (2010). Global map of irrigation areas version 5. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8), 1481-1490.
- Six, J., Elliott, E., Paustian, K., & Doran, J. (1998, September). Aggregation and Soil Organic Matter Accumulation in Cultivated and Native Grassland Soils. *Soil Science Society of America Journal* 62(5), 62(5), 1367-1377. doi:DOI:10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x

- Stevenson, F. (1982). *Nitrogen in Agricultural Soils*. (I. American Society of Agronomy, Éd.) New York, USA, USA: American Society of Agronomy, I. doi:DOI:10.2134/agronmonogr22
- Stevenson, F. (1994). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. Inde: . (J. Wiley, Éd.) New York, USA, USA: Wiley. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Humus_Chemistry/7kCQch_YKoMC?hl=fr&gbpv=0
- Stevenson, , F. (1994). *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions*. Inde: Wiley. (WILEY, Éd.) New York, USA, USA: John WILEY & SONS, INC. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Humus_Chemistry/7kCQch_YKoMC?hl=fr&gbpv=0
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I., & Murphy, A. (s.d.). *Plant Physiology and Development* (Vol. 6). (I. Sinauer Associates, Éd.) Massachusetts , U.S.A, U.S.A: Sinauer Associates, Inc . Récupéré sur <https://biologywala.com/wp-content/uploads/2021/06/compressed-6th-edition-Plant-Physiology-by-Lincoln-Taiz-Eduardo-Zeiger-biologywala.com-compressed.pdf>
- Tano, B., Brou, C., Dossou-Yovo, E., Saito, K., Futakuchi, K., Wopereis, M., & Husson, O. (2020, Novembre 15). Spatial and Temporal Variability of Soil Redox Potential, pH and Electrical Conductivity across a Toposequence in the Savanna of West Africa. (MDPI, Éd.) *Agronomy*, 10(1787), 1-22. doi:doi:10.3390/agronomy10111787
- Tisdall, J., & Oades, J. (1982, June). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *EJSS*, 33(2), 141-163. doi:doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x
- Tisdall, J., & Oades, J. (1982). Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33(2), 141-163. doi:doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x
- Tokarz, E., & Urban, D. (2015, July 1). SOIL REDOX POTENTIAL AND ITS IMPACT ON MICROORGANISMS AND PLANTS OF WETLANDS. *Journal of Ecological Engineering*, 16(3), 20–30. doi:DOI: 10.12911/22998993/2801
- UNESCO . (2020). *L'Eau et les changement climatiques*. (I. s. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, Éd.) Paris, France , France: UNESCO. Récupéré sur https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000373060_fre

- Unifa. (2017). *Fiches pratiques de fertilisation*. (L. Planquette, Éd.) Paris, France, France: Laurence Planquette, Unifa. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Fiches_pratiques_de_fertilisation/On7QswEACAAJ?hl=fr
- Vargas, R., Pankova, E., Balyuk, S., & Krasiln, P. (2018). *Handbook for saline soil management*. (FAO, Éd.) Rome, Italie: FAO. Récupéré sur <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/1b8b05e9-a7dc-4883-a631-f5299f273d4e/content>
- Vepraskas, M. (2015). *Redoximorphic Features for Identifying Aquic Conditions*. (©. 2. University, Éd.) Carolina, USA, USA: © 2015 NC State University. Récupéré sur https://content.ces.ncsu.edu/static/publication/js/pdf_js/web/viewer.e56617a9a878.html?slug=redoximorphic-features-for-identifying-aquic-conditions
- Wang , L., Liu, J., Sun, G., Wei, X., Liu, S., & Dong, Q. (2012). Water, climate, and vegetation: ecohydrology in a changing world. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16,, 16, 4633–4636. doi:doi:10.5194/hess-16-4633-2012
- Weil , R., & Brady, N. (2016). *Nature and Properties of Soils, the global edition*. (P. Education, Éd.) New Yourk: Royaume-Uni: Pearson Education. Récupéré sur https://www.google.dz/books/edition/Nature_and_Properties_of_Soils_The_Globa/5YgWDQAAQBAJ?hl=fr
- Weil, R., & Brady, N. (2017). *THE NATURE AND PROPERTIES OF SOILS* (Vol. 15th Edition). (15th, Éd.) New Yourk, USA: Pearson. Récupéré sur <https://www.amazon.com/Nature-Properties-Soils-15th/dp/0133254488>
- Zama , N., Kirkman, K., Mkhize, N., Tedder, M., & Magadlela, A. (2022, Decembre 17). Soil Acidification in Nutrient-Enriched Soils Reduces the Growth, Nutrient Concentrations, and Nitrogen-Use Efficiencies of *Vachellia sieberiana* (DC.) Kyal. & Boatwr Saplings. (MDPI, Éd.) *Plants*, 11(24), 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/plants11243564>