

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA

FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTEMENT D'AGRONOMIE



Réf :/UAMOB/F.SNV.ST/DEP.AGR/2023

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Domaine : SNV

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Sciences de sol

Présenté par :

BOUDJEMAA Yasser

Thème

**Utilisation du SIG dans la cartographie geospatial de la
fertilité des des sol**

Soutenu le: 13 / 09 /2023

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom

Grade

Mr. LEBDIRI Farid

MAA

Univ. de Bouira

Président

Mr. SALIM Lamine

MCA

Univ. de Bouira

Promoteur

Mr. AIT KACI

MAA

Univ. de Bouira

Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos vifs remerciements :

Tous d'abord, nous remercier dieu le clément et la miséricorde dieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travaille

***A nos familles** : qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant toutes nos études.*

***A M^{er} Salim lamine** : notre promoteur, pour avoir accepté de nous guider sur le bon chemin du travail.*

***Aux membres de jury** : pour avoir accepté de juger notre travail.*

A tous les enseignants de département d'agronomie, leurs soutien techniques et pédagogiques.

Sans oublié nos amis et collègues de travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents qui m'ont donné tout pour réussir, aucune expression ne pourrait exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte.

A toi ma mère chérie qui m'a donné la vie et la joie de vivre, ta bonne éducation, tes conseils et tes bénédictions m'ont jamais fait défaut. Que dieu te garde pour nous.

A toi mon père, l'œil attentif et compréhensif, mon exemple et la personne la plus digne de mon estime et mon respect.

Recevez à travers ce travail toute ma gratitude et mes profonds sentiments, que Dieu vous préserve et vous accorde santé, bonheur et longue vie.

A toute ma famille : mon grand-père, mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes cousines.

Enfin à tous ce qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction général 1

Chapitre I : Fondements et composants du sol

I.1. Généralités sur les sols 4

I.1.1. Définition du sol 4

I.1.2. Diverses phases du sol 4

I.1.2.1. Phase liquide du sol 4

I.1.2.2. Phase gazeuse du sol 5

I.1.2.3. Phase solide du sol 5

I.1.2.3.1. Éléments grossiers 6

I.1.2.3.2. Terre fine 6

I.1.3. Fractions constitutives du sol 7

I.1.3.1. Fractions minérales 7

I.1.3.2. Fractions organiques 7

I.1.4. Différents horizons d'un sol 9

I.1.5. Les propriétés du sol 11

I.1.5.1. Propriétés physiques 11

I.1.5.1.1. Texture 11

I.1.5.1.2. Structure du sol 13

I.1.5.1.3. Porosité 14

I.1.5.1.4. Résistance mécanique 15

I.1.5.2. Propriétés chimiques 15

I.1.5.2.1. PH du sol 15

I.1.5.2.2. Échange ionique 16

I.1.5.2.3. Capacité d'échange cationique 17

I.1.5.2.4. Conductivité électrique 17

I.1.5.2.5. Salinité 18

I.1.5.2.6. Anion et cation	18
I.1.5.2.6.1. Sulfate	18
I.1.5.2.6.2. Nitrate	19
I.1.5.2.6.3. Nitrite	19
I.1.5.2.6.4. Phosphore assimilable et le phosphore total	19
I.1.5.2.6.5. Magnésium.....	20
I.1.5.2.6.6. Potassium	21
I.1.5.2.7. Adsorption des espèces anioniques organiques sur des argiles	21
I.2. Fertilité des sols agricoles	22
I.2.1. Composantes de la fertilité des sols	22
I.2.2. Paramètres physiques.....	23
I.2.2.1. Paramètres chimiques	23
I.2.2.2. Paramètres biologiques	24
I.2.3. Carbone organique du sol	24
I.2.3.1. Cycle du carbone organique.....	25
I.2.4. Importance de la fertilisation	26

Chapitre II: Télédétection et SIG dans la fertilité du sol

II.1. Télédétection	28
II.1.1. Introduction	28
II.1.2. Principe de la télédétection.....	28
II.1.3. Domaine d'application de la télédétection	29
II.2. Système d'information géographique SIG	30
II.2.1. Historique	30
II.2.2. Définition d'système d'information géographique.....	30
II.2.3. Données géographique	31
II.2.3.1. Système de coordonnées	31
II.2.3.2. Projection d'une carte	31
II.2.3.2.1. Échelle	32
II.2.3.3. Mode raster	32
II.2.3.4. Mode vecteur	32
II.2.3.4.1. Notion de couche	33
II.2.3.5. Modèle numérique de terrain (MNT)	34
II.2.3.5.1. Caractéristiques des MNT	34

II.2.3.6. DEM (Digital Élévation Model).....	35
II.2.4. Composantes d'un SIG.....	35
II.2.5. Fonctionnalités du S.I.G.....	36
II.2.6. Rôle des SIG.....	37
II.2.7. Domaines d'application du SIG.....	38

Chapitre III: matériel et méthodes

III.1. Présentation du la zone d'étude.....	40
III.1.1. Localisation géographique de la wilaya.....	40
III.1.2. Présentation de La commune Khabouzia (ferme pilote BK).....	40
III.1.2.1. Etude climatique de la wilaya du Bouira.....	41
III.1.2.1.1. Précipitation.....	41
III.2. Présentation lieu de stage.....	42
III.2.1. Groupe ASMIDAL.....	42
III.2.1.1. ASFERTRADE.....	43
III.2.1.1.1. Activation de groupement d'ASFERTRADE.....	43
III.3. Matériel et protocole expérimentale.....	44
III.3.1. Phase terrain.....	44
III.3.1.1. Préparation de jour de la sortie.....	44
III.3.1.1.1. Campagnes de prélèvement et mesure in-situ.....	45
III.3.1.1.2. Equipements et méthodes de mesure.....	46
III.3.2. L'analyse au laboratoire.....	46
III.3.2.1. Préparation d'échantillonnages.....	46
III.3.2.2. Dosage du calcaire total dans le sol.....	47
III.3.2.2.1. Matérielle.....	47
III.3.2.2.2. Mode d'emploi.....	48
III.3.2.3. Perméabilité du sol.....	49
III.3.2.3.1. Matérielle.....	49
III.3.2.3.2. Test de détermination du coefficient de transmission à tension constante.....	49
III.3.2.4. Texture du sol.....	50
III.3.2.4.1. Matérielles.....	50
III.3.2.4.2. Application de la texture.....	50
III.3.2.5. L'humidité du sol.....	52
III.3.2.5.1. Matérielles.....	52

III.3.2.5.2. Mode d'emploi	52
III.3.2.6. Matière organique du sol.....	53
III.3.2.6.1. Matérielle	53
III.3.2.6.2. Mode d'emploi	53
III.3.2.7. pH du sol	54
III.3.2.7.1. Matérielle	54
III.3.2.7.2. Mode d'emploi	55
III.3.2.8. Conductivité électrique du sol (CE).....	55
III.3.2.8.1. Matérielle	55
III.3.2.8.2. Mode d'emploi	56
III.3.2.9. Analyse des éléments du sol.....	56
III.3.2.9.1. Matérielles.....	56
III.3.2.9.2. Analyse Cu du sol	57
III.3.2.9.2.1. Mode d'emploi	57
III.3.2.9.3. Analyse Fe du sol	58
III.3.2.9.3.1. Mode d'emploi	58
III.3.2.9.4. Analyse P du sol.....	58
III.3.2.9.4.1. Mode d'emploi	58
III.3.2.9.5. Analyse AL du sol.....	58
III.3.2.9.5.1. Mode d'emploi	58
III.3.2.9.6. Analyse NH ₃ ⁻ du sol	58
III.3.2.9.6.1. Mode d'emploi	58
III.3.2.10. La couleur du sol	59
III.4. Analyses physico-chimiques du sol par cartographie	60
III.4.1. Logicielle utilisez (Arc Mapp 10.7.1)	60

Chapitre IV: Résultats et discussions

IV.1. Estimation des paramètres physico-chimiques des sols (ferme pilote).....	62
IV.1.1. Présentation des paramètres mesurés in-situ (pH, CE, perméabilité, M.O, L'humidité, Les éléments du sol (Cu, Al, Fe, NH ₃ ⁻ , P), texture, la couleur)	63
IV.1.1.1. Variation de Potentille Hydrique de sol dans la ferme pilote (BK).....	63
IV.1.1.2. Variation de la salinité travers conductivité électrique de sol dans la ferme pilote (BK).....	64
IV.1.1.3. Variation de matière organique de sol dans la ferme pilote (BK)	66

IV.1.1.4. Variation de l'humidité de sol dans la ferme pilote (BK).....	67
IV.1.1.5. Variation de phosphore de sol dans la ferme pilote (BK).....	67
IV.1.1.6. Variation de cuivre du sol dans la ferme pilote (BK)	68
IV.1.1.7. Variation d'Azote ammoniacale du sol dans la ferme pilote (BK).....	69
IV.1.1.8. Variation du dosage du calcaire total du sol dans la ferme pilote (BK)	70
IV.1.1.9. Variation la perméabilité du sol dans la ferme pilote (BK)	71
IV.1.1.10. Variation du fer du sol dans la ferme pilote (BK).....	72
IV.1.1.11. Variation d'aluminium du sol dans la ferme pilote (BK)	72
IV.1.1.12. Variation texture du sol dans la ferme pilote (BK).....	73
IV.1.1.13. Variation la couleur du sol dans la ferme pilote (BK)	74
Conclusion générale	77
Références bibliographiques	
Résumé	

Liste des figures

Figure 1: Le profil du sol (http://www.suelosdearagon.com/userfiles/images/perfil.jpg).	9
Figure 2: Diagramme de classification détaillée des textures (JAMAGNE, 1976).	13
Figure 3: Différentes structures de sol (Gobat et <i>al.</i> , 1998).	14
Figure 4: Observation de la porosité à différentes échelles (Girard et <i>al.</i> , 2005).	15
Figure 5: Le complexe adsorbant du sol (jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO4-2012.pdf).	17
Figure 6: Cycle du carbone dans le sol (Georges, 2011).	25
Figure 7: Etapes de la télédétection (CCT).	29
Figure 8: Mode Raster et Vecteur (Kharchi I et al ,2022).	33
Figure 9: Représentation des images Raster et Vecteur (Kharchi I et al ,2022).	33
Figure 10: Principe de combinaison des caractéristiques en couches thématiques (DUCROT, 2005).	33
Figure 11: Schéma des composantes d'un SIG.	36
Figure 12: Les fonctionnalités du S.I.G (NOTTET, 2002).	37
Figure 13: Carte de situation géographique du Bouira (photo originel Arc Mapp 10.7.1).	40
Figure 14: Carte de situation géographique du commune Ain Bessem (photo originel Arc Mapp 10.7.1).	41
Figure 15: les déférents produits d'engrais (Photo originale).	44
Figure 16: le matérielle et les étapes d'échantillonnage sur le terrain (photo originale).	45
Figure 17: Palin test pour les analyses chimiques (photo originel).	46
Figure 18: Opération de tamisage pour obtenir la terre fine (Photo originale).	47
Figure 19: les étapes du détermine dosage du calcaire d'échantillonne (photo originale).	49
Figure 20: cellule constant (photo originale).	50
Figure 21: la méthode du boudin (photo originale).	51
Figure 22: les trois fractions du sol (photo originelle).	52
Figure 23: les étapes de la mesure l'humidité (photo originelle).	53
Figure 24: les étapes mesurent la matière organique (photo originale).	54
Figure 25: Multi paramètre du sol (photo originale).	55
Figure 26: les déférentes extrais du sol (Photo originale).	57
Figure 27: les complémente spécialisée du chaque élément (Photo originale).	57
Figure 28: les étapes d'analyses des éléments du sol (Photo originale).	59

Figure 29: Charte de Munsell (Photo originale).....	60
Figure 30: Histogramme de la variation de ph des 15 échantillonne mesure (photo originale).	64
Figure 31: Histogramme de la variation de salinité des 15 échantillonne mesure (photo originale).	65
Figure 32: Histogramme de la variation de MO des 15 échantillonne mesure (photo originale).	66
Figure 33: Histogramme de la variation d'humidité des 15 échantillonne mesure (photo originale).	67
Figure 34: Histogramme de la variation du phosphore des 15 échantillonne mesure (photo originale).	68
Figure 35: Histogramme de la variation du cuivre des 15 échantillonne mesure (photo originale).	69
Figure 36: Histogramme de variation NH ₃ - des 15 échantillonne mesure (photo originale). .	69
Figure 37: Histogramme de la variation du calcaire total des 15 échantillonne mesure (photo originale).	70
Figure 38: Histogramme de la variation de la perméabilité des 15 échantillonne mesure (photo originale).	71
Figure 39: Histogramme de la variation de fer des 15 échantillonne mesure (photo originale).	72
Figure 40: Histogramme de la variation d'aluminium des 15 échantillonne mesure (photo original).	73

Liste des tableaux

Tableau 1: les principaux constituant du sol (Soltner, 2005).....	8
Tableau 2: Echelle de salinité du sol (USSL, 1981).	18
Tableau 3: la précipitation dans la wilaya du Bouira (2015-2021) (direction hydraulique, 2023).....	42
Tableau 4: Résultats des paramètres mesurés (pH, CE, perméabilité, M.O, L'humidité, Les éléments du sol (Cu, Al, Fe, NH ₃ -, P), texture, la couleur,) pour les (15) échantillonne.....	62
Tableau 5: La texture des 15 échantillonne dans la ferme BK (originelle).....	74
Tableau 6: La couleur des 15 échantillonne dans la ferme BK (originel).....	75

Liste des abréviations

An année

BK	Boubkeur Saidi
B	bore
CE	Conductivité électrique
Cm	centimètre
CEC	capacité d'échange cationique
Ca	calcium
Cu	cuivre
Cl	chlore
C	carbone
CO ₂	dioxyde de carbone
CAH	Complexe argilo-humique
C°	Degré Celsius
D	Dimension
DEM	Modèle numérique d'élévation
Etc	Excitera
E	Echantillonne
FAO	Food agriculture organisation
Fig	Figure
Fe	Fer
GPS	Global positionig system
H	l'hydrogène
Ha	Hectare
H ₂ O	l'eau
IPI	International Potash Institut
K	Potassium

Liste des abréviations

MO	Matière organique
mm	millimètre
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
MNT	Modèle numérique de terrain
N°	Numéro
N	l'azote
O	l'oxygène
P	Phosphore
Pi	Phosphore minérale
Po	Phosphore organique
pH	Potentielle Hydrique
S	Soufre
S.A.T	Superficie agricole totale
SAU	Superficie Agricole Utile
T°	Température
Unifa	Union des industries de la fertilisation
Vol	Volume
Zn	Zinc
µm	micromètre
%	pourcent

Introduction générale

Introduction général

En pédologie, le sol peut être défini comme un système dynamique qui se trouve à la frontière entre la lithosphère, la biosphère et l'atmosphère. Il s'agit d'un milieu poreux, hétérogène, discontinu et structuré, formant la couche supérieure de la croûte terrestre. Le sol est un environnement triphasé constitué d'une matrice solide composée de minéraux et de matière organique, ainsi que des phases gazeuses et liquides qui forment la solution du sol (**Bouzi L, 2019**).

Le vaste territoire de l'Algérie se caractérise par la présence de plusieurs types de sols, chacun ayant une fonction spécifique (agriculture, industrie, construction, etc.) et étant influencé par le climat méditerranéen. Les études sur les sols algériens sont au cœur des préoccupations des experts et des spécialistes en science du sol. Cependant, la réalisation d'études de sol dans chaque région naturelle nécessite un important travail d'investigation.

Sur une carte, l'Algérie s'étend sur une vaste superficie, mais les terres arables demeurent en quantité limitée, représentant légèrement plus de 7,5 millions d'hectares sur une superficie totale de 42 millions, soit seulement 17,8 % du territoire. Les terres fertiles, susceptibles d'être exploitées par les agriculteurs, se trouvent dispersées au sein de vastes étendues presque désertiques (**Lombard M, 1971**).

La fertilisation implique l'introduction d'éléments essentiels au développement des plantes dans un environnement tel que le sol. La fertilité est étroitement liée à la capacité du sol à stocker ces nutriments et à les redistribuer naturellement pour soutenir la production agricole grâce à son activité biologique. Elle constitue ainsi un élément essentiel de la productivité biologique du sol (**Ovin ALP, 2023**).

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) offrent la possibilité d'intégrer des données spatiales provenant de diverses sources et de les représenter sous forme de cartes. À l'intérieur des SIG, des outils d'analyse puissants permettent d'étudier les comportements de ces données dans l'espace et dans le temps (**Florent O, 2014**). Les méthodes géostatistiques d'interpolation spatiale sont utilisées pour cartographier la qualité du sol à partir des résultats d'analyses de sol sur des cartes. De nombreuses techniques sont disponibles pour évaluer les paramètres de qualité des sols de la ferme pilote et quantifier les caractéristiques physiques ou chimiques, notamment le pH, la conductivité, l'humidité, la matière organique, la texture, la teneur totale en calcaire, la perméabilité, la couleur, ainsi que les éléments du sol tels que le P, Al, Cu, NH₃- et Fe.

Les objectifs spécifiques de notre travail sont les suivants :

1. Déterminer la qualité des sols de la ferme pilote BK en effectuant des mesures in-situ, suivies d'analyses en laboratoire portant sur les paramètres physico-chimiques de 15 échantillons de sol de la couche superficielle.
2. Établir des cartographies des paramètres physico-chimiques mesurés afin de pouvoir interpréter leurs variations géospatiales en utilisant un Système d'Information Géographique (ArcGIS 10.7.1).

Pour mener à bien cette étude, nous adopterons la méthodologie suivante :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons une revue générale sur l'eau et ses sources de pollution.
- Le deuxième chapitre se penchera sur l'utilisation des SIG et de la cartographie dans l'évaluation de la qualité des sols.
- Le troisième chapitre sera consacré à la présentation de la ferme étudiée, des différentes méthodes d'analyse utilisées, ainsi que du matériel employé, en mettant en avant les techniques d'analyses mises en œuvre.
- Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats de l'analyse physico-chimique de la qualité du sol de la ferme pilote, accompagnés d'une discussion des résultats obtenus

Notre étude sera clôturée par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre I : Fondements et composants du sol

I.1. Généralités sur les sols

Les sols sont des systèmes multiphasiques complexes et hétérogènes composés d'air, d'eau et de composants solides tels que le sable, le limon, l'argile, la matière organique (MO), les nutriments, les écosystèmes, etc. Ils sont des médias ouverts et dynamiques, échangeant de la matière et de l'énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère (**Sposito.G, 1997**). Les sols remplissent cinq fonctions principales :

- Fournir un habitat physique, chimique et biologique pour les organismes vivants.
- Réguler les flux d'eau, le stockage et le recyclage des cycles des nutriments et d'autres éléments.
- Maintenir les activités et la diversité biologique pour soutenir la croissance des plantes et la productivité des animaux.
- Filtrer, tamponner, transformer, immobiliser et détoxifier les substances organiques et inorganiques.
- Fournir un support mécanique aux organismes vivants et à leurs structures (**Nortcliff, 2002**).

I.1.1. Définition du sol

Le sol est la couche superficielle meuble de la lithosphère terrestre, ayant une épaisseur variable allant de quelques centimètres à plusieurs mètres. Il est constitué d'un mélange de matériaux minéraux et organiques, agissant en tant que support et milieu naturel pour la croissance des plantes. (**Boulaine. J, 1989**).

Cette couche, connue sous le nom de couverture pédologique, est le résultat de plusieurs facteurs génétiques qui ont agi au fil du temps :

- La roche-mère sur laquelle elle s'est développée.
- Les facteurs environnementaux tels que le climat, le relief et la végétation.

Ces facteurs ont contribué à la formation et à l'évolution du sol, donnant lieu à une grande diversité de types de sols à travers le monde (**Boulaine, 1989**).

I.1.2. Diverses phases du sol**I.1.2.1. Phase liquide du sol**

La phase liquide du sol, couramment appelée "solution du sol", occupe une part variable de la porosité du sol. Elle est principalement composée d'eau, dans laquelle se trouvent des substances organiques et minérales dissoutes, ainsi que des particules en suspension. La composition de la solution du sol varie en fonction de plusieurs facteurs :

- Le climat.
- Les apports anthropiques tels que les fertilisants et les produits de traitement phytosanitaire.
- L'activité biologique du sol, notamment les exsudats racinaires et les produits de synthèse et de dégradation microbienne.

Ces différents éléments influencent la composition chimique et la disponibilité des nutriments présents dans la solution du sol. La compréhension de cette phase liquide du sol est cruciale pour évaluer les processus de transport des nutriments, la rétention de l'eau et la réaction des sols aux pratiques agricoles et environnementales.

I.1.2.2. Phase gazeuse du sol

Dans un sol bien aéré, la phase gazeuse du sol est composée des gaz suivants dans son atmosphère :

- L'azote (78 à 80 %)
- L'oxygène (18 à 20 %)
- Le dioxyde de carbone (0,2 à 3 %)

En plus de ces gaz, d'autres molécules gazeuses d'origine anthropique telles que les pesticides ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) peuvent également être présentes dans l'atmosphère du sol. Ces gaz peuvent exister dans le sol de deux manières :

À l'état libre, c'est-à-dire qu'ils occupent les espaces vides entre les particules du sol.

Dissous dans la solution du sol, où ils se trouvent sous forme dissoute dans l'eau présente dans le sol.

Cependant, dans certaines conditions, telles que l'hydromorphie, la phase gazeuse peut être absente. Dans de telles situations, tout l'espace poreux du sol est occupé par l'eau, ce qui rend le sol saturé (**Calvet, 2003**).

La composition et la présence de la phase gazeuse du sol jouent un rôle essentiel dans de nombreux processus du sol, tels que la respiration des racines, les échanges gazeux avec l'atmosphère et la transformation des substances chimiques. Comprendre ces aspects de la phase gazeuse du sol est crucial pour évaluer les conditions de croissance des plantes, les cycles des éléments et les interactions avec l'environnement.

I.1.2.3. Phase solide du sol

La phase solide du sol est principalement constituée de composants minéraux. On peut distinguer plusieurs éléments dans cette phase :

I.1.2.3.1. Éléments grossiers

Les éléments grossiers du sol sont ceux dont la taille est supérieure à 2 mm Ils sont classés en fonction de leurs dimensions :

- De 0,2 cm à 2 cm : on les appelle des graviers.
- De 2 cm à 5 cm : ils sont qualifiés de cailloux.
- De 5 cm à 20 cm : on les nomme pierres.
- Au-delà de 20 cm : on les désigne comme des blocs.

La présence de ces éléments grossiers est exprimée en pourcentage, tant sur le terrain en fonction du volume qu'en laboratoire en fonction de la masse. En laboratoire, cela est évalué en tamisant un échantillon de sol avec une maille de 2 mm, puis en calculant le pourcentage par rapport à la masse totale de l'échantillon.

La proportion et la distribution des éléments grossiers dans le sol ont un impact sur sa structure, sa perméabilité et sa capacité de rétention d'eau. De plus, ils peuvent influencer la pénétration des racines des plantes et les processus d'érosion. L'étude de la phase solide du sol est donc essentielle pour comprendre sa composition, sa texture et ses propriétés physiques.

I.1.2.3.2. Terre fine

La terre fine correspond à la fraction du sol qui reste une fois les éléments grossiers retirés (c'est-à-dire ceux dont la taille est supérieure à 2 mm, après tamisage). Les éléments de la terre fine peuvent être classés en fonction de leurs dimensions :

- De 2 mm à 0,2 mm : on parle de sables grossiers.
- De 0,2 mm à 50 μm : ce sont les sables fins.
- De 50 μm à 20 μm : on qualifie ces éléments de limons grossiers.
- De 20 μm à 2 μm : ce sont les limons fins.
- Inférieurs à 2 μm : on les appelle les argiles.

La terre fine comprend également une fraction organique, dont le pourcentage varie en fonction du type de sol et des conditions de pédogenèse. Les sols cultivés peuvent présenter des taux de matière organique compris entre moins de 1 % et 20 % de la masse totale du sol (**Calvet, 2003**).

La composition de la terre fine, tant en termes de dimensions des particules que de matière organique, influe sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Ces éléments jouent un rôle crucial dans la rétention et la disponibilité des nutriments, la rétention d'eau, l'aération du sol et la formation de la structure du sol. L'étude de la fraction de terre fine est donc essentielle pour comprendre la texture du sol et ses caractéristiques fondamentales.

I.1.3. Fractions constitutives du sol

Le sol est composé de deux fractions principales qui jouent un rôle essentiel dans la sorption des polluants : les fractions organiques et minérales.

I.1.3.1. Fractions minérales

Dans le sol, on retrouve principalement trois catégories de fractions minérales :

- Les silicates, qui sont des oxydes de silice présentant une grande diversité de structures. On distingue des unités isolées (comme l'olivine $(\text{Fe}, \text{Mg})_2[\text{SiO}_4]$), des chaînes (comme le pyroxène $(\text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{SiO}_3)_2$) et des feuillets (comme la smectite). Ils sont souvent associés à des cations métalliques tels que l'aluminium, le fer ou le magnésium.
- Les oxydes, oxy-hydroxydes et hydroxydes, qui sont abondants dans les sols. Parmi les plus importants, on trouve la gibbsite (oxyde d'aluminium $\text{Al}(\text{OH})_3$), la goethite et l'hématite (oxydes de fer (FeO-OH , Fe_2O)), la birnessite et la lithiophorite (oxydes de manganèse).
- Les carbonates, parmi lesquels les carbonates de calcium (calcite) et les carbonates de magnésium (dolomite $(\text{Ca}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$) sont les plus abondants. Ils peuvent copécipiter avec d'autres métaux (par exemple, la calcite magnésienne) ou former un revêtement sur d'autres minéraux, modifiant ainsi leurs propriétés de surface.

Ces fractions minérales jouent un rôle crucial dans de nombreux processus du sol, tels que la rétention des éléments nutritifs, la stabilisation des agrégats, la réaction aux polluants et la formation de la structure du sol. Leur composition et leurs propriétés influencent directement la fertilité du sol et sa capacité à stocker et à libérer des nutriments essentiels pour les plantes.

L'étude des fractions minérales du sol permet de mieux comprendre la dynamique des éléments dans l'environnement pédologique et contribue à l'élaboration de stratégies de gestion durable des sols (Sposito, 2008).

I.1.3.2. Fractions organiques

En ce qui concerne la matière organique ou la phase organique du sol, elle englobe tout ce qui est composé de carbone organique, qu'il soit d'origine vivante ou non vivante (insectes, végétaux, humus, microorganismes, etc.).

L'humus est un terme qui regroupe l'ensemble de la matière organique non vivante du sol et peut être classifié en deux catégories :

Les substances non humiques, qui correspondent à la fraction de matière organique dont les caractéristiques biophysico-chimiques sont reconnaissables. Il s'agit, par exemple, des hydrates de carbone, des protéines, des acides aminés, des lipides, etc.

Les substances humiques, qui résultent de la transformation chimique ou biologique (altération, polymérisation, etc.) de la matière organique présente dans le sol.

La matière organique joue un rôle fondamental dans les propriétés et les processus du sol. Elle contribue à la fertilité du sol en fournissant des éléments nutritifs aux plantes, en améliorant la structure du sol, en favorisant la rétention d'eau et en favorisant l'activité biologique. De plus, elle participe à la séquestration du carbone et joue un rôle important dans le cycle des nutriments et dans la régulation de la disponibilité des éléments dans le sol.

L'étude des fractions organiques du sol permet de mieux comprendre les interactions entre la matière organique, les microorganismes du sol et les processus biogéochimiques qui régissent la dynamique des éléments dans l'environnement pédologique. Cela contribue à une meilleure gestion des sols et à la préservation de leur fertilité à long terme (Pansu, 2001).

Il convient de noter que ce tableau, présentant les principaux constituants du sol selon Soltner (2005), offre une vue d'ensemble des éléments clés qui composent le sol. Cependant, il est important de souligner que la composition du sol peut varier en fonction de nombreux facteurs, tels que le type de sol, le climat, la végétation et les pratiques agricoles.

Tableau 1: les principaux constituants du sol (Soltner, 2005).

	Constituants solides		Constituants liquides (solution du sol)	Constituants gazeux (atmosphère du sol)
	Minéraux	Organiques		
Origine	Désagrégation physique et altération biochimique des roches	Décomposition des êtres vivants	Précipitations, nappes, ruissellement	Air hors sol, matières en décomposition, respiration
Critères de classement	Taille (granulométrie) Qualité (minéralogie)	Etat (vivants, morts) Qualité chimique (originelle, transformée)	Origine (météorique, phréatique) Etat physique (potentiel hydrique) Qualité chimique	Origine (air, organismes) Qualité chimique
Catégories	Selon granulométrie • squelette (> 2 mm) • terre fine (< 2 mm) Selon minéralogie • quartz • minéraux silicatés • min. carbonatés	• organismes vivants • organismes morts • matières organiques héritées: cellulose, lignine, résines • matières organiques humifiées: acides fulviques et humiques, humines	• eau • substances dissoutes: glucides, alcools, acides organiques et minéraux, cations et anions	• gaz de l'air: N ₂ , O ₂ , CO ₂ • gaz issus de la respiration et de la décomposition des organismes: CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , NH ₃

Il est également essentiel de comprendre que ce tableau peut être complété par d'autres paramètres spécifiques en fonction des besoins de l'étude ou de l'analyse du sol. Par exemple, lors d'une étude approfondie de la fertilité du sol, il peut être pertinent d'ajouter des informations sur les niveaux de matière organique, les concentrations en nutriments spécifiques, les propriétés chimiques du sol telles que le pH et la conductivité électrique, ainsi que d'autres éléments liés à la santé et à la qualité globale du sol.

I.1.4. Différents horizons d'un sol

Dans une première approche simplifiée, les horizons du sol peuvent être regroupés en quelques ensembles principaux, appelés horizons majeurs, qui sont désignés par des lettres majuscules. Cette classification d'une couverture pédologique en un nombre limité d'horizons, bien qu'elle repose sur une observation in situ des horizons réels, demeure arbitraire. En effet, l'identification d'un horizon diagnostique est une subdivision intellectuelle subjective d'un objet réel (Clément, 2011).

La figure 1 présente un profil pédologique captivant, offrant une visualisation en coupe des différentes couches de sol. Chaque strate révèle des caractéristiques distinctes, telles que la couleur, la texture et la structure du sol. On peut observer des horizons bien définis, indiquant des processus de formation et d'évolution du sol au fil du temps. Cette figure permet d'appréhender la complexité et la diversité des composants du sol, ainsi que les interactions entre eux.



Figure 1: Le profil du sol (<http://www.suelosdearagon.com/userfiles/images/perfil.jpg>).

Ces couches distinctes correspondent aux horizons qui, ensemble, composent le profil du sol. Selon le type de sols rencontrés, ces horizons peuvent être subdivisés en plusieurs sous-horizons. On distingue généralement quatre horizons principaux (Baize D. Et Jabiol B, 1995).

- **L'horizon O** : également appelé horizon humifère ou horizon organique, est la couche du sol dans laquelle les débris végétaux s'accumulent à la surface. On y trouve des débris végétaux plus ou moins dégradés, mais encore reconnaissables. La composition et l'épaisseur de cet horizon varient en fonction de l'activité biologique, telle que l'action des détritivores saprophages, coprophages et nécrophages, ainsi que du climat et de la présence éventuelle d'inhibiteurs comme certains métaux lourds ou toxiques **(Baize D. Et Jabiol B, 1995)**
- **L'horizon A** : également appelé horizon organo-minéral ou couche arable, est caractérisé par la présence simultanée de matière organique transformée (où les débris ne sont plus reconnaissables) et de matière minérale. Dans certains cas exceptionnels, il peut résulter principalement de l'infiltration de matière organique soluble dans le sol. Cependant, généralement, il est formé par le brassage mécanique effectué par les organismes vivant dans le sol tels que les vers de terre, les insectes, ou par l'intervention de la charrue dans les sols cultivés, ce qui achève le processus de minéralisation. Cela explique la prédominance des éléments minéraux mélangés à la matière organique humifiée **(Clément, 2009)**.

Le lessivage des éléments les plus solubles, tels que les anions et les cations (comme Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} - qui se lient à la silice et surtout à la matière organique soluble - et Si^{4+} non fixés sur le complexe argilo-humique lorsque l'humus n'est pas suffisamment épais), entraîne leur migration latérale ou leur déplacement vers les horizons inférieurs. Dans le cas où la roche-mère est acide, cela peut entraîner la décoloration de l'horizon lorsqu'une grande quantité de matière organique (comme les acides humiques et fulviques) est entraînée. De plus, ce complexe peut subir une désaturation progressive des cations tels que Ca^{2+} et leur remplacement par les ions hydronium H^+ , ce qui entraîne une décalcification lente du sol et une acidification de l'horizon **(Philippe, 1990)**.

- **L'horizon B** : également connu sous le nom d'horizon minéral, horizon illuvial ou sous-sol, est caractérisé par une accumulation de divers constituants tels que l'argile, le fer, la matière organique, le carbonate de calcium, etc. Dans certains cas assez rares, ces apports proviennent soit de la partie supérieure du profil du sol, soit de manière latérale (par exemple, le carbonate de calcium). Cependant, dans de nombreux cas, il s'agit plus d'un enrichissement apparent que réel. Cet horizon B résulte en partie de la transformation in situ des minéraux primaires provenant de la roche sous-jacente et encore présents dans cet horizon (néoformation d'argiles, libération et oxydation du

fer, etc.). De plus, il se distingue par un contraste avec l'horizon E sus-jacent, qui est réellement appauvri.

L'horizon B se distingue par sa couleur, sa structure, la nature de ses constituants et sa granulométrie.

- **Horizon C** : C'est un horizon d'altération de la roche-mère dans lequel la transformation de celle-ci reste limitée si bien que nombre de ses caractères originels (litage, schistosité, minéraux) sont encore très visibles. Elle résulte de la météorisation mécanique (cryoclastie, thermoclastie, haloclastie et hydroclastie)...), chimique (pourrissement de la roche par les transformations minérales, via divers processus impliquant essentiellement l'eau : hydratation-déshydratation, hydrolyse, oxydo-réduction, carbonatation par l'action du dioxyde de carbone, dissolution karstique) mais aussi biologique (biométéorisation commandée par des organismes vivants (flore, faune, fonge et microorganismes tirant leur alimentation du pourrissement de la roche). L'évolution minéralogique a déjà commencé ainsi que les pertes de matière sous forme d'ions solubles (altération chimique qui passe inaperçue) (**Jean, 2009**).

I.1.5. Les propriétés du sol

Les sols varient d'un endroit à un autre en raison de divers facteurs qui ont contribué à la formation de chaque type de sol. Les facteurs pédogénétiques différents entraînent des processus pédogénétiques distincts, ce qui confère au sol des caractéristiques uniques selon sa localisation. Ces différences se manifestent à la fois sur le plan physique, chimique et biologique.

I.1.5.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques du sol jouent un rôle essentiel dans la croissance des plantes en influençant leur enracinement ainsi que leur approvisionnement en eau et en minéraux (**SOUTY, 1987**).

I.1.5.1.1. Texture

La texture ou la granulométrie du sol se réfère à la répartition des particules sédimentaires en fonction de leur taille. C'est une caractéristique permanente du sol qui est considérée comme la plus importante (**GOBAT et al, 2010**). La texture exerce une influence prédominante sur les propriétés physiques et chimiques du sol. Plus le sol est argileux, plus sa fertilité chimique est élevée, tandis qu'un sol sableux présente une bonne fertilité physique. En d'autres termes, la teneur en argile du sol influe sur sa capacité à retenir les éléments nutritifs, tandis que la présence de sable favorise le drainage et l'aération, bénéfiques à la croissance

des plantes. Comprendre la texture du sol est donc essentiel pour adapter les pratiques agricoles et optimiser les rendements des cultures.

Les critères précis qui permettent de distinguer une fraction texturale d'une autre varient en fonction du système de classification. Les catégories couramment utilisées sont définies selon l'échelle d'Aherberg, qui divise la fraction fine du sol (particules dont le diamètre est inférieur à 2 mm) en 5 fractions distinctes. Les fractions de sédiments sont les suivantes :

- Argile : diamètre inférieur à 2 μm (0,002 mm)
- Limon fin : diamètre de 0,002 mm à 0,02 mm
- Limon grossier : diamètre de 0,02 mm à 0,05 mm
- Sable fin : diamètre de 0,05 mm à 0,2 mm
- Sable grossier : diamètre de 0,2 mm à 2 mm

Bien que la granulométrie repose uniquement sur la taille des sédiments, les différentes fractions sont souvent constituées de minéraux variés :

- Sable : principalement du quartz, ainsi que des feldspaths et des micas. On y trouve peu de minéraux secondaires.
- Limon : 50% de quartz et 50% de feldspaths, de micas et de minéraux secondaires tels que les oxydes de fer et d'aluminium.
- Argile : essentiellement des minéraux secondaires, avec une prédominance très marquée des phyllosilicates. Dans les environnements humides tropicaux, on trouve également une grande quantité d'oxydes de fer et d'aluminium.

La fraction grossière du sol, constituée de particules dont le diamètre est supérieur à 2 mm (comme les graviers et les cailloux), a un impact considérable sur l'aération, la circulation de l'eau et l'érodabilité du sol.

La texture du sol est une caractéristique stable qui influence directement sa structure, sa porosité et son régime hydrique (**ARAGNO et al., 2003**).

Les textures fines sont naturellement plus perméables que les textures grossières.

La texture du sol influence également l'enracinement des plantes, en favorisant ou limitant le développement spatial du système racinaire (**CALLOT et al., 1982**) (**ARAGNO et al., 2003**). Il est admis que la croissance des racines est favorisée par une texture grossière (**CALLOT et al., 1981**)

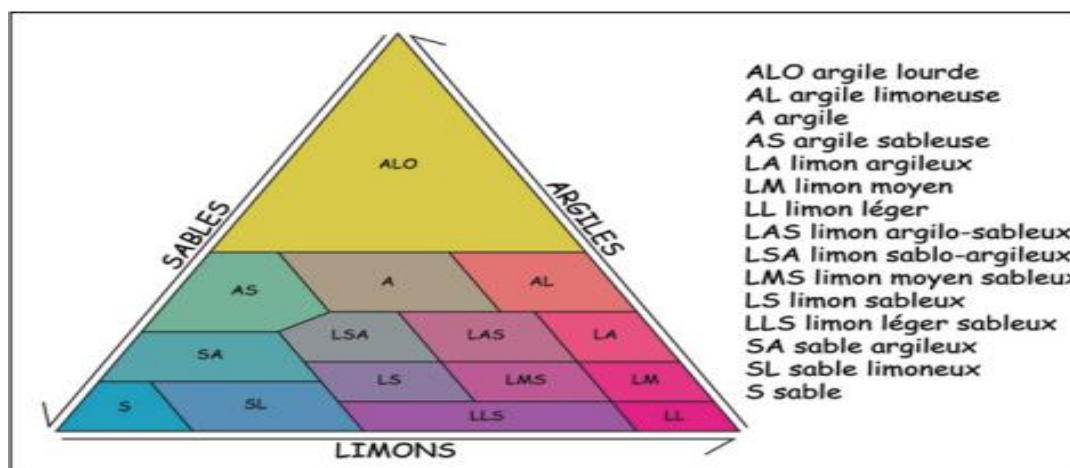


Figure 2: Diagramme de classification détaillée des textures (JAMAGNE, 1976).

I.1.5.1.2. Structure du sol

La structure du sol correspond à son état à court terme. Elle représente l'arrangement des agrégats qui sont formés par l'assemblage des particules du sol. Selon la présence ou l'absence d'agrégats, on distingue deux types de structures. Une structure avec des agrégats, appelée structure fragmentaire, peut être arrondie, anguleuse ou feuilletée. Une structure sans agrégats, appelée structure continue (cours pédologie, 2004).

La formation de la structure du sol est principalement le résultat de perturbations physiques d'origine anthropique ou climatique (OADES, 1993 ; EL TITI, 2003). Les fissures créées par ces perturbations sont généralement allongées. L'activité biologique des organismes du sol contribue également à la formation de la structure, mais joue surtout un rôle majeur dans sa stabilisation. La dégradation de la structure est causée par l'action de l'homme ou du climat (YOUNG *et al.*, 1998). Dans les systèmes de labour, la structure du sol est principalement créée par les opérations de travail du sol, tandis que dans les systèmes non labourés (semis direct), la structure est principalement formée par l'action du climat (en surface dans les régions tempérées) et par des processus biologiques (OORTS, 2006).

En général, dans les milieux à structure continue, les racines sont peu nombreuses, droites et présentent une forme filiforme. En revanche, dans les sols à structure construite, les racines sont sinueuses, ramifiées et garnies de nombreux poils absorbants (HENIN, *et al.*, 1969; CALLOT *et al.*, 1981).

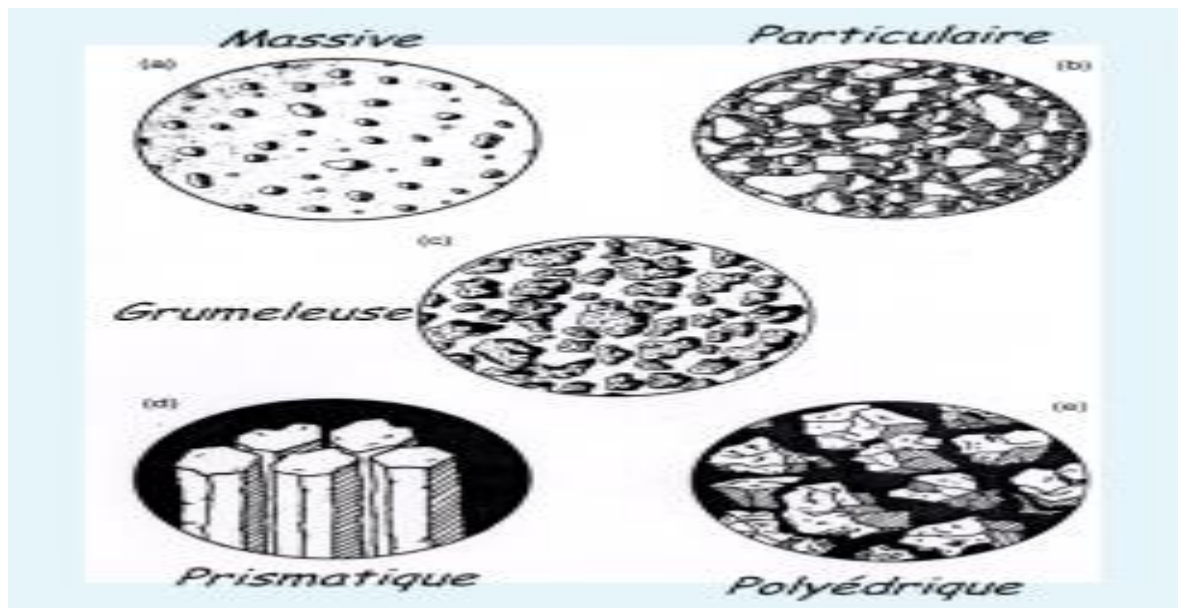


Figure 3: Différentes structures de sol (Gobat et al., 1998).

I.1.5.1.3. Porosité

La porosité du sol est influencée par le degré d'humidité et se répartit principalement entre l'eau et l'air. Elle reflète le volume des vides et fournit des informations sur les capacités hydriques et atmosphériques (GOBAT et al., 2010). La porosité donne ainsi une indication de l'état structural du sol.

Selon la taille des pores, la porosité est subdivisée en différentes catégories. La macroporosité concerne les vides de plus de 50 μm , qui peuvent être remplis par l'eau par gravité, rapidement drainés et colonisés par les racines moyennes. La méso-porosité, également appelée porosité capillaire, se compose de vides de 0,2 à 50 μm , qui retiennent l'eau utilisable par les plantes. Enfin, la microporosité concerne les vides inférieurs à 0,2 μm , qui retiennent l'eau inutilisable (ARAGNOU et al., 2003). La mésoporosité dépend largement de la texture du sol, tandis que la macroporosité est liée à la structure.

La porosité peut être classée en fonction de son origine :

- Porosité d'altération
- Porosité texturale
- Porosité structurale

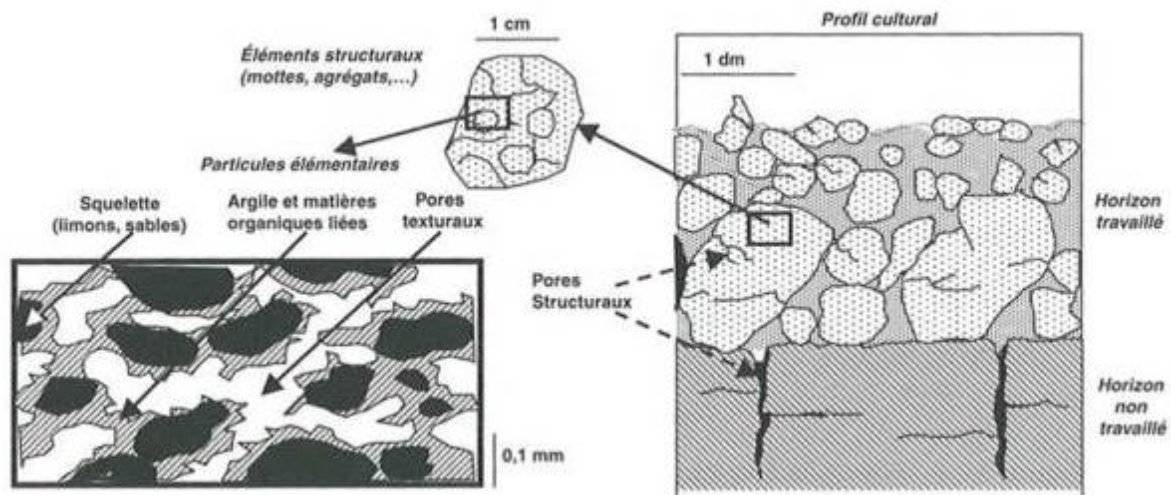


Figure 4: Observation de la porosité à différentes échelles (Girard et al., 2005).

I.1.5.1.4. Résistance mécanique

La résistance mécanique du sol à la pénétration et aux voies de circulation pour la progression des racines dépend de plusieurs caractéristiques essentielles du sol, notamment sa texture, sa porosité, sa structure, sa stabilité structurale et l'humidité. Ces facteurs jouent un rôle déterminant dans la résistance que le sol oppose à la croissance des racines. Il convient de souligner que cette résistance mécanique est sujette à des variations à la fois temporelles et spatiales, comme l'ont indiqué (DEMOLON, 1968) et (CALLOT et al, 1981).

La racine possède une remarquable capacité d'adaptation aux variations de la résistance mécanique du sol. Elle parvient à réguler son potentiel total en le maintenant constant, ce qui lui permet de s'adapter aux contraintes rencontrées. Cette adaptation se manifeste par une augmentation de la pression de turgescence exercée par les cellules racinaires, comme l'ont mis en évidence (BOIFFIN et MARIN-LAFLECHE 1990).

Il est ainsi fascinant d'observer comment les racines sont capables de réagir aux conditions mécaniques du sol en ajustant leur fonctionnement interne pour assurer leur croissance et leur développement optimal. Cette capacité d'adaptation témoigne de la remarquable plasticité des systèmes racinaires et de leur capacité à exploiter au mieux les ressources disponibles malgré les contraintes rencontrées.

I.1.5.2. Propriétés chimiques

I.1.5.2.1. PH du sol

Le pH (potentiel hydrogène) du sol est une mesure qui indique le degré d'acidité ou d'alcalinité du sol sur une échelle de 0 à 14. Il joue un rôle crucial dans la dynamique des

éléments nutritifs et dans leur disponibilité pour les plantes, d'où l'importance de sa détermination.

Un sol considéré comme neutre et équilibré présente un pH de 7, tandis qu'un pH inférieur à 7 indique un sol acide. À l'inverse, un pH supérieur à 7 indique un sol basique, souvent riche en calcaire.

Il est intéressant de noter que les sols saumâtres (caractérisés par une forte présence d'ions Na^+ sur le complexe adsorbant du sol) présentent généralement des valeurs de pH beaucoup plus élevées, pouvant atteindre facilement des chiffres de 10 (AUBERT, 1982).

La connaissance du pH du sol est essentielle pour comprendre et gérer les interactions entre les éléments nutritifs, les organismes du sol et les plantes. Il permet de déterminer les amendements nécessaires pour ajuster le pH du sol et favoriser ainsi des conditions optimales pour la croissance végétale.

I.1.5.2.2. Échange ionique

Le sol présente la propriété de retenir diverses substances. En effet, les cations et les anions peuvent être retenus par le complexe adsorbant du sol, qui est constitué d'un ensemble de colloïdes chargés négativement ou positivement.

Les ions sont retenus sous forme échangeable, ce qui signifie que lorsque le sol est en contact avec une solution contenant des ions différents de ceux retenus par le sol, un échange se produit entre les ions du complexe adsorbant et ceux de la solution :



L'adsorption ionique dans le sol est réversible : les ions échangeables du complexe adsorbant sont en équilibre avec la solution du sol. Toute modification de la composition de la solution du sol entraîne un changement de cet équilibre par échange : certains ions du complexe passent dans la solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions qui étaient auparavant dans la solution (adsorption).

Cette capacité d'échange ionique du sol joue un rôle crucial dans la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes. Les ions adsorbés peuvent être libérés dans la solution du sol et être absorbés par les racines des plantes, assurant ainsi leur approvisionnement en nutriments essentiels.

Le pouvoir adsorbant et la propriété qui possède le complexe adsorbant du sol, de retenir à sa surface des ions provenant de la solution du sol, cette définition est illustrée dans le schéma ci-dessous :

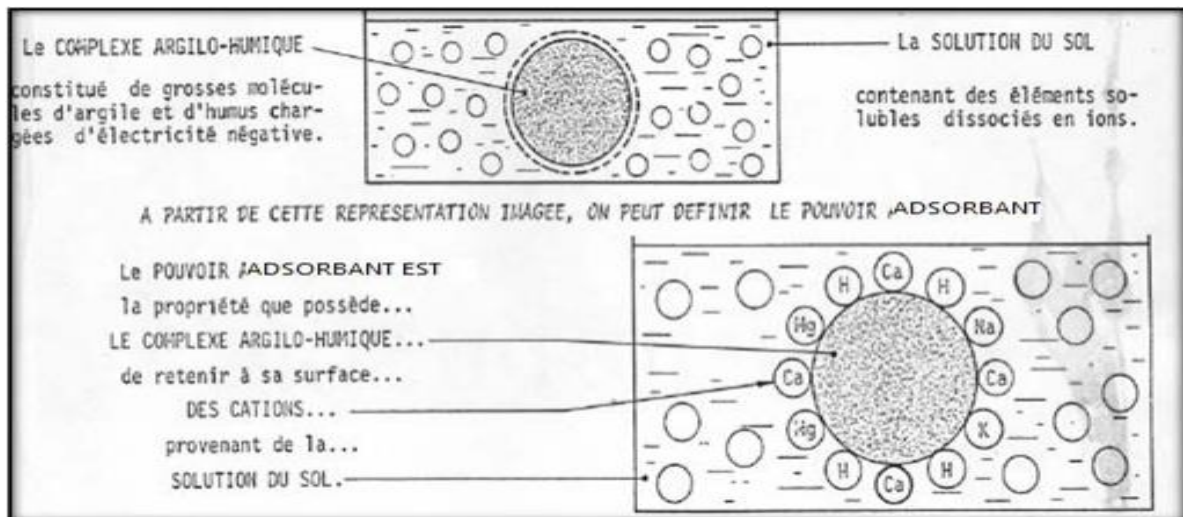


Figure 5: Le complexe adsorbant du sol (jymassenet-foret.fr/cours/pedologie/PEDO4-2012.pdf).

I.1.5.2.3. Capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique du sol représente la taille du réservoir permettant de stocker de manière réversible certains éléments fertilisants cationiques (potassium, magnésium, calcium...). La CEC est liée au complexe argilo humique.

La valeur de la CEC d'un sol est donc fonction des quantités d'argile et de matière organique qu'il contient, mais aussi de la nature de ces éléments et du pH du sol (Tessier, 1984 ; Duchaufour, 1988 ; Morel, 1989). Ainsi, un sol présentant une teneur en argile de 20% peut très bien montrer une CEC inférieure à un sol présentant une teneur en argile de 15%, en fonction de supports géologiques, de passés pédoclimatiques et de mode de mise en valeur différents.

I.1.5.2.4. Conductivité électrique

La conductivité électrique, également appelée salinité, est une mesure du degré de salinité du sol étudié. Elle est déterminée en utilisant un conductimètre sur un extrait de sol (rapport sol/eau = 1/5) (Delaunois, 1976). Les valeurs obtenues sont ensuite comparées à une étude de salinité, résumée dans le tableau (2).

Tableau 2: Echelle de salinité du sol (USSL, 1981).

Conductivité électrique (ms/cm)	
0 – 0,6	Non salé
0,6 – 1,4	Peu salé
1,4 – 2,4	Salé
2,4 – 6	Très salé

I.1.5.2.5. Salinité

Le processus de salinisation des sols se produit lorsque la concentration de la solution du sol dépasse un certain seuil en raison de l'évaporation, d'un drainage insuffisant ou de l'altération des minéraux et de l'accumulation de complexes d'altération. Au-delà de ce seuil, les plantes subissent une sécheresse physiologique due à une forte pression osmotique et une toxicité de certains éléments (Montoroi, 2005).

La salinisation du sol est évaluée en termes de salinité, qui correspond à la quantité de sels solubles préjudiciables à la production végétale. La salinisation est un processus pédogénétique qui nécessite la présence d'une source de sels solubles dans un climat à évaporation élevée (Cherbuy, 1991). Dans les systèmes irrigués, un dysfonctionnement hydrologique est souvent à l'origine de la salinisation des terres. En effet, un excès d'eau entraîne la remontée d'une nappe phréatique salée, tandis qu'un manque d'eau provoque une lixiviation insuffisante des sels (Boivin et al., 1998).

I.1.5.2.6. Anion et cation

I.1.5.2.6.1. Sulfate

Les sulfates sont des sels d'acide sulfurique (H_2SO_4), des composés qui se forment avec l'anion sulfate (SO_4^{2-}) et d'autres ions tels que l'ion magnésium, l'ion potassium ou l'ion cuivre, par exemple. Les sulfates sont couramment présents dans les engrais.

La limite maximale de sulfate recommandée par l'OMS dans les lignes directrices de qualité pour l'eau potable, conformément aux accords de Genève de 1993, est de 500 mg/L. Les normes de l'UE, qui sont plus récentes (1998), sont plus strictes et complètes que celles de l'OMS, suggérant une limite maximale de 250 mg/L de sulfates dans l'eau destinée à la consommation humaine (<https://www.lenntech.fr/sulfates.htm#ixzz76xG89AOD>).

La concentration d'ions sulfate dans les eaux naturelles est très variable. Dans les zones où les sols ne contiennent pas une proportion significative de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/L, mais ce chiffre peut être largement dépassé (jusqu'à 300 mg/L) dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est prolongé **(RODIER et al, 2009)**.

Les sulfates se dissolvent dans l'eau principalement à partir de certains minéraux, en particulier le gypse, et apparaissent également suite à l'oxydation de minéraux sulfureux **(KEMMER, 1984)**.

I.1.5.2.6.2. Nitrate

Le nitrate (NO_3^-) est un ion produit lors du cycle de l'azote, hautement soluble dans l'eau et responsable de la pollution des ressources hydriques. La principale source d'azote provient de l'atmosphère sous forme de diazote (N_2), qui constitue près de 80% de la composition de l'air.

Les nitrates (ou azote nitrique) sont la forme d'azote la plus couramment présente dans les eaux naturelles. Ils constituent la majeure partie de l'azote inorganique (N inorganique) ou minéral, qui est lui-même inclus dans l'azote total (NGL) ou azote total (NT) aux côtés d'une autre composante, l'azote organique (N organique) **(RODIER et al, 2009)**.

I.1.5.2.6.3. Nitrite

L'ion nitrite est la base conjuguée de l'acide nitreux. L'acide nitreux est un acide faible et instable de formule HNO_2 . La formule de l'ion nitrite est NO_2^- .

La teneur en nitrites peut varier considérablement en fonction de l'origine des eaux. La méthode utilisant la sulfanilamide présente une sensibilité de l'ordre de quelques microgrammes par litre. En raison des processus biologiques, l'équilibre entre l'ammoniac, les nitrites et les nitrates peut évoluer rapidement. Il est donc nécessaire de prendre en compte ces facteurs lors de l'interprétation des résultats et de prendre toutes les précautions nécessaires en termes de pureté des réactifs et de propreté du matériel de laboratoire. Il est recommandé de doser les nitrites le plus tôt possible après le prélèvement, en conservant l'échantillon à une température de 4 °C **(RODIER et al, 2009)**.

I.1.5.2.6.4. Phosphore assimilable et le phosphore total

Le phosphore (P) est un élément nutritif essentiel dans la nutrition minérale des plantes, tout comme l'azote et le potassium. Cependant, il est considéré comme un élément nutritif critique en raison de sa faible concentration dans le sol (environ 600 ppm de P total en moyenne) et de sa faible solubilité (environ 0,05 mg P L⁻¹ de solution du sol). Le phosphore

existe dans le sol sous forme inorganique et organique. Les formes inorganiques sont associées à des composés amorphes ou cristallins d'aluminium et de fer dans les sols acides, et à des composés de calcium dans les sols alcalins. Les formes organiques de P sont liées à la matière organique du sol.

La présence de phosphore dans les eaux naturelles résulte du lessivage de certains minéraux et de la décomposition de la matière organique. Les eaux usées domestiques et industrielles, ainsi que le drainage des terres agricoles fertilisées, contribuent à augmenter sa concentration. Le phosphore n'est pas toxique pour les humains, les animaux ou les poissons, mais sa teneur est contrôlée principalement pour ralentir l'eutrophisation des systèmes aquatiques (CEAEQ, 2011).

Le dosage du phosphore assimilable repose sur la formation et la réduction d'un complexe entre l'acide phosphorique et l'acide molybdique. Dans une solution d'oxalate d'ammonium contenant un phosphate, l'ajout d'un réactif sulfo-molybdique et d'une solution d'acide ascorbique provoque, par chauffage, le développement d'une coloration bleue dont l'intensité est proportionnelle à la concentration en ortho-phosphates (LAMBERT, 1975).

Le phosphore total représente la teneur globale des organophosphates, des phosphates condensés et des formes organiques de phosphore présentes dans l'eau.

I.1.5.2.6.5. Magnésium

En tant qu'éléments indispensables à la vie et jouant un rôle important dans la respiration, le magnésium peut avoir des origines naturelles (telles que la dissolution des roches magnésites, basaltes et argiles) ou industrielles. Dans l'eau, la dureté manganésienne représente généralement environ un tiers de la dureté totale. Un excès de magnésium confère à l'eau un goût amer (KEMMER, 1984).

Dans le sol, le magnésium se trouve sous trois formes :

- Minéraux silicatés, argileux et carbonatés.
- Adsorbé sur les particules argileuses et organiques (capacité d'échange cationique).
- En solution dans le sol.

Ces formes sont présentes de manière inégale, avec un rapport approximatif de 1000 / 20 La teneur totale en magnésium dans les sols est généralement de l'ordre de 0,2 à 0,8 %, ce qui équivaut à 10 à 40 tonnes par hectare dans la couche labourée. Environ les deux tiers se trouvent dans la fraction argileuse.

Dans les sols très acides en présence d'aluminium soluble, le magnésium peut être précipité et rendu insoluble avec les composés d'aluminium. Il est libéré lorsque le pH de l'eau augmente, par exemple suite à un apport de chaux.

Les pertes de magnésium dans le sol sont principalement dues à l'exportation par les cultures, au lessivage, au ruissellement et à l'érosion. Dans le sol, le magnésium est plus mobile que le potassium.

I.1.5.2.6.6. Potassium

Le potassium est un métal alcalin étroitement lié au sodium, au point qu'il est rarement analysé comme un constituant distinct dans les analyses de l'eau. Sa présence est moins courante dans la nature (**KEMMER, 1984**).

La teneur en potassium dans les sols varie entre 0,3 et 3 %. Le potassium se trouve dans la solution du sol sous forme d'ions K^+ . Dans la fraction échangeable, les ions potassium sont adsorbés à la surface négativement chargée du complexe argilo-humique (composé de minéraux argileux et d'humus).

I.1.5.2.7. Adsorption des espèces anioniques organiques sur des argiles

Les argiles sont des minéraux hydrophiles. Leur incorporation dans des milieux organiques entraîne une mauvaise dispersion en raison de l'incompatibilité entre les particules d'argile (hydrophiles) et les matrices organiques (hydrophobes ou lipophiles) (**Cabrera et al., 2015**) (**Khatem, 2017**)

Afin d'améliorer la miscibilité de ces phyllosilicates avec les matrices organiques, il est nécessaire de les rendre plus organophiles. Cette modification s'effectue en remplaçant le cation échangeable inorganique par un surfactant cationique organique, tel que des ammoniums ou des phosphoniums, lors d'une réaction d'échange. Ces surfactants (molécules tensioactives) possèdent une tête polaire hydrophile et une chaîne aliphatique apolaire. Lors de la réaction d'échange, la tête polaire du tensioactif remplace le cation et le surfactant se loge dans l'espace interfoliaire, rendant ainsi l'argile organophile (**Hermosin and Cornejo, 1989**) (**Khatem, 2017**).

Les argiles organophiles sont donc des argiles échangées avec des agents de surface spécifiques afin d'acquérir des propriétés favorisant leur dispersion dans les milieux organiques. Elles présentent un intérêt considérable en raison de leurs applications dans différents secteurs industriels tels que le traitement des eaux, le forage, les peintures, la fonderie, les cosmétiques, etc. (**Jayne and Boyd, 1991**) (**Khatem, 2017**).

En réalité, ces argiles organiques sont une reproduction du complexe organo-argileux du sol, et en fonction du type de cation organique, de la charge lamellaire de l'argile et du degré de saturation, le matériau résultant présente une grande diversité (**Hermosin and Cornejo, 1989**).

Cette substitution améliore les propriétés adsorptives de l'argile vis-à-vis des composés ioniques hydrophobes (**Cabrera et al., 2015**).

De plus, les argiles ont une charge négative (**Ruellan and Delétang, 1967**) (**Caillère et al., 1982**) (**Decarreau et al., 1990**).

Généralement, pour éliminer les espèces anioniques, on traite l'argile pour lui donner une charge globale de surface plutôt positive.

Dans le domaine de l'adsorption en milieu aqueux, ce sont principalement les argiles intercalées par des espèces organiques cationiques, désignées sous le nom d'argiles organophiles (**Yariv and Cross, 2001**) (**Bouras, 2003**) (**Khatem, 2017**), qui ont été utilisées dans le traitement des polluants organiques anioniques (**Yariv and Cross, 2001**) (**Bouras, 2003**) (**Khatem, 2017**).

I.2. Fertilité des sols agricoles

Selon Brackman et Brady, cités par Servat (1976), le sol est "un produit naturel synthétisé sous forme de profil, constitué d'un mélange variable de minéraux plus ou moins fragmentés et altérés, ainsi que de matière organique en décomposition qui recouvre la surface terrestre en une fine couche, et qui, lorsqu'il contient les quantités nécessaires d'air et d'eau, fournit le support mécanique et en partie la nutrition des plantes".

Cette définition du sol, qui prend en compte le point de vue de l'agronome, met en évidence les principaux constituants du sol ainsi que sa fonction essentielle dans l'agriculture, qui est de servir de support et de fournir la nutrition aux plantes. Pour remplir cette fonction, le sol doit présenter certaines propriétés qui déterminent sa fertilité. La fertilité d'un sol est définie comme sa capacité à produire (**Sebillotte, 1982 ; Pieri, 1989**).

Outre les propriétés liées au sol, cette capacité dépend également d'autres facteurs et conditions environnementales qui influencent la croissance et le développement des plantes. Il s'agit notamment du climat et des pratiques culturales.

I.2.1. Composantes de la fertilité des sols

Selon Boiffin et Sebillotte (1982), les composantes de la fertilité du sol regroupent l'ensemble des propriétés qui jouent un rôle déterminant dans le processus de production

végétale. Traditionnellement, ces composantes sont classées en paramètres physiques, chimiques et biologiques.

I.2.2. Paramètres physiques

Selon DELOMON (1968), les facteurs physiques essentiels de la fertilité des sols sont l'état structural et la capacité de rétention de l'eau.

La structure du sol, qui correspond à la manière dont les composants minéraux et organiques sont assemblés, joue un rôle déterminant dans la croissance des plantes et l'activité biologique du sol en influençant l'aération. Elle influence également le développement du système racinaire et le transfert des facteurs de croissance tels que l'eau, l'oxygène et les éléments minéraux. Dans les zones tropicales sèches, les structures des sols sont souvent fragiles et peu développées selon BOYER (1983). Cependant, ce même auteur souligne que les types de structures les plus couramment rencontrés sont relativement favorables à l'agriculture.

En ce qui concerne l'eau, elle constitue le principal facteur limitant qui peut affecter la production végétale et entraîner des variations de rendement d'une année à l'autre. La disponibilité en eau pour les plantes dépend du profil du sol, caractérisé par sa capacité de rétention, son point de flétrissement et sa profondeur.

Il est donc essentiel de prendre en compte ces facteurs physiques dans la gestion des sols afin d'optimiser la fertilité et d'assurer des conditions favorables à la croissance des plantes.

I.2.2.1. Paramètres chimiques

Parmi tous les paramètres de fertilité, ce sont les facteurs chimiques qui ont été le plus quantifiés par les agronomes. Le modèle des bilans minéraux est un outil couramment utilisé pour suivre la fertilité chimique des sols. Les agronomes sont particulièrement avancés dans l'analyse des facteurs chimiques (**SEBILLOTTE, 1989**).

Cette avancée s'explique probablement par le fait que le rendement des cultures est souvent associé à la richesse chimique du sol (**PIERI, 1989**).

Il convient cependant de faire la distinction entre l'abondance des éléments nutritifs présents dans le sol, qui est liée à la nature de la roche mère, et la quantité d'éléments mobilisables, qui dépend de l'environnement physico-chimique et biologique. Ce dernier aspect peut être modifié par les systèmes de culture. Par exemple, les systèmes de culture qui exportent les résidus sans apporter de fertilisants peuvent appauvrir le sol. La diminution des

niveaux d'éléments chimiques s'accompagne souvent d'une acidification et de diverses formes de toxicité (**BOYER, 1983**).

C'est pourquoi le suivi de l'évolution du pH est souvent utilisé pour évaluer les changements de fertilité des sols.

I.2.2.2. Paramètres biologiques

Les aspects biologiques de la fertilité sont liés à l'activité biologique du sol, qui est générée par la présence de divers groupes d'organismes vivants tels que la faune, les micro-organismes et les racines des plantes.

Selon MOREL (1989), l'activité biologique joue un rôle important dans la fertilité du sol en influençant à la fois le stock d'éléments minéraux assimilables grâce à la minéralisation de la matière organique, et la structure du sol. (**MOREL, 1989**)

SWIFT et SANCHEZ (1984) expliquent le rôle des processus biologiques du sol dans la productivité végétale en se basant sur le cycle de l'azote. En ce qui concerne cet élément, nous pouvons retenir les points suivants :

- La disponibilité de l'azote est souvent un facteur limitant en agriculture tropicale. Dans les cultures non fertilisées, la seule source d'azote minéral provient de la minéralisation de l'azote présent dans la matière organique du sol.
- La fixation atmosphérique symbiotique, réalisée notamment par certaines bactéries présentes dans les nodules racinaires de légumineuses, contribue à augmenter le stock d'azote organique pouvant être restitué au sol.

Ces processus biologiques du sol, tels que la décomposition de la matière organique, la symbiose avec les micro-organismes fixateurs d'azote et les interactions entre les racines des plantes et la rhizosphère, sont essentiels pour la disponibilité des éléments nutritifs et la santé globale du sol. Ils favorisent la libération et l'assimilation des nutriments par les plantes, tout en contribuant à l'amélioration de la structure et de la fertilité du sol.

Ainsi, une gestion appropriée de l'activité biologique du sol, par le biais de pratiques agricoles durables telles que la rotation des cultures, l'apport de matière organique et la préservation de la biodiversité du sol, est essentielle pour maintenir et améliorer la fertilité biologique du sol. Cela permet de favoriser une agriculture productive et respectueuse de l'environnement. (**SWIFT et SANCHEZ, 1984**).

I.2.3. Carbone organique du sol

Le carbone organique du sol, constituant principal des matières organiques, suscite une préoccupation majeure en raison de son importance pour les enjeux agronomiques tels

que la fertilité physique, chimique et biologique des sols, ainsi que pour les enjeux environnementaux tels que la qualité de l'eau et le stockage de carbone. La perte de matière organique, et donc de carbone organique, entraîne la dégradation de la structure du sol, le rendant fortement vulnérable à l'érosion et réduisant sa fertilité (Smith et al., 1995).

I.2.3.1. Cycle du carbone organique

Le carbone constitue l'élément principal de la matière organique du sol et sa présence joue un rôle déterminant dans la qualité du sol. La perte de matière organique, et par conséquent de carbone organique, entraîne la dégradation de la structure du sol, le rendant fortement vulnérable à l'érosion et réduisant sa fertilité (Smith et al., 1995).

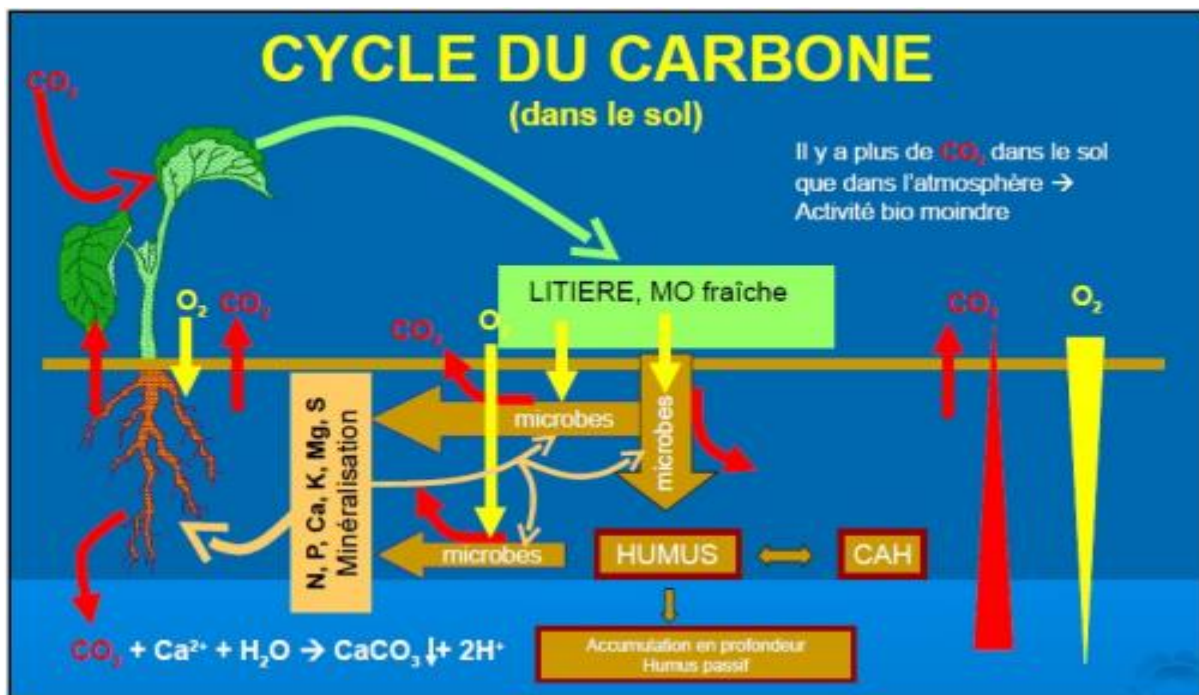


Figure 6: Cycle du carbone dans le sol (Georges, 2011).

Le cycle complexe du carbone (fig.6) maintient un équilibre naturel entre les sources et les puits de carbone terrestre, qu'il s'agisse de formes minérales, organiques ou gazeuses. Les formes gazeuses se trouvent dans l'atmosphère ainsi que dans la partie supérieure des sols et des océans, et elles sont soumises à un échange rapide d'une durée inférieure à cinq ans. Le carbone atmosphérique peut également être absorbé par la biomasse terrestre, se retrouvant ainsi stocké dans les tissus des plantes. Ces plantes sont ensuite en partie consommées par des organismes hétérotrophes, et le carbone est soit rejeté sous forme gazeuse dans l'atmosphère, soit minéralisé dans les sols (Alexandrov, 2008).

La vie sur Terre a une influence profonde sur la composition de l'atmosphère en libérant du dioxyde de carbone (CO_2) et du méthane (CH_4). La majeure partie de ces

émissions est produite par les processus de respiration et de fermentation. La photosynthèse et la respiration sont les deux réactions chimiques fondamentales du cycle de recyclage du carbone (**anonyme 1**).

I.2.4. Importance de la fertilisation

L'amélioration des rendements agricoles passe inévitablement par la fertilisation, une étape cruciale qui requiert une évaluation précise afin d'atteindre le point d'optimum économique.

Il est possible d'étudier aisément l'efficacité des engrais ainsi que la réaction des cultures à la fertilisation sur un sol donné en procédant à l'application de différentes doses d'engrais sur des parcelles voisines. En comparant les rendements obtenus de ces essais, il devient possible d'appréhender un autre aspect essentiel de la fertilisation : les engrais permettent également une exploitation plus efficace de la terre et, par extension, de l'eau. Cette réalité revêt une importance capitale dans les régions à faibles précipitations ou lorsqu'une irrigation s'avère nécessaire. Dans de telles situations, l'utilisation des engrais pourrait multiplier par deux, voire plus, le rendement obtenu par unité d'eau utilisée. (**FAO, 2005**)

Chapitre II :
Téledétection et SIG dans la
fertilité du sol

II.1. Téledétection

II.1.1. Introduction

La téledétection a été réformée de manière spectaculaire jusqu'à la sophistication moderne des capteurs embarqués à bord des satellites en orbite autour de la Terre, permettant l'échantillonnage de presque toutes les régions du spectre électromagnétique avec des résolutions spatiales inférieures au mètre. Ainsi, la téledétection spatiale permet actuellement l'étude de notre planète en fournissant une vision synoptique et répétitive qui facilite l'acquisition de données sur une courte période de temps. Néanmoins, les images de téledétection ne peuvent nous fournir que des informations concernant la couche la plus superficielle. **(DENIS, 2012)**

Depuis des décennies, la téledétection demeure un outil fondamental pour l'étude et l'analyse à l'échelle locale et régionale. Ce manuel va exposer les principaux paramètres liés aux domaines marins, terrestre et atmosphérique, permettant ainsi une analyse systématique des nombreux paramètres géophysiques d'un grand intérêt pour les chercheurs, les entreprises, les gouvernements et le grand public.

II.1.2. Principe de la téledétection

Le rayonnement émis par une source d'énergie ou d'illumination (A) parcourt une certaine distance et interagit avec l'atmosphère (B) avant d'atteindre la cible (C). La surface de la cible interagit avec l'énergie en fonction des caractéristiques de rayonnement et des propriétés de la surface. Le rayonnement est soit réfléchi, soit diffusé vers le capteur (D) qui l'enregistre et peut ensuite transmettre l'énergie par des moyens électroniques à une station de réception (E), où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques). Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image (F) est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible. La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, découvrir de nouveaux aspects ou aider à résoudre un problème particulier (G) **(Fig.7) (CCT)**.

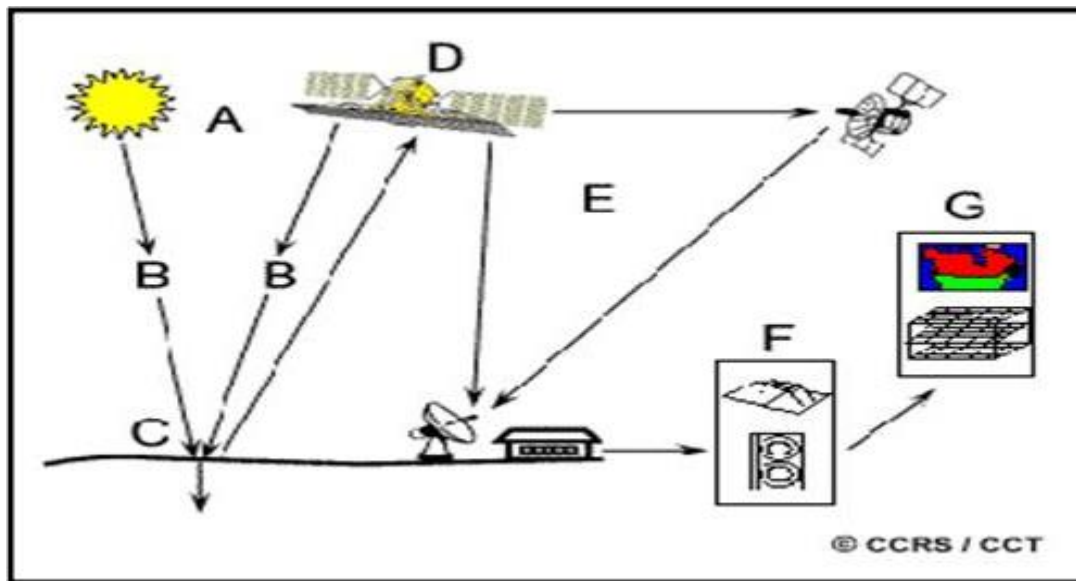


Figure 7: Etapes de la télédétection (CCT).

II.1.3. Domaine d'application de la télédétection

Selon (Kergomard,2004), la télédétection a bénéficié à trois grands domaines :

- Le premier domaine d'application majeur de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). Dans ce domaine, l'intérêt de la télédétection réside dans sa capacité à assurer une couverture globale et fréquemment répétée de la planète entière ; la résolution spatiale n'étant pas primordiale pour les applications météorologiques.
- En océanographie, la télédétection offre l'avantage de fournir une vision synoptique de vastes régions, chose difficile à obtenir par les moyens traditionnels tels que les bateaux. Pour certaines études à petite échelle, les données provenant des satellites météorologiques sont largement utilisées en océanographie, notamment pour l'observation des températures de surface de l'océan.
- Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées, et leur champ d'utilisation continue de s'élargir : cartographie, géologie, prospection minière, surveillance des cultures et de la couverture forestière, urbanisme, aménagement du territoire, génie civil, et bien d'autres encore. Le traitement de l'imagerie satellitaire numérique est une discipline en constante évolution, et la baisse des coûts des équipements informatiques a entraîné une augmentation rapide du nombre d'utilisateurs.

II.2. Système d'information géographique SIG**II.2.1. Historique**

Au cours des années 60 et 70, de nouvelles approches ont accordé une importance grandissante à l'utilisation des cartes dans la gestion des ressources naturelles. À mesure que la prise de conscience des interrelations entre divers phénomènes sur la surface terrestre augmentait, il est devenu impératif de développer des outils de gestion à la fois globaux et pluridisciplinaires. Cette nécessité s'est rapidement imposée.

À la fin des années 70, la technologie de la cartographie assistée par ordinateur avait réalisé d'importants progrès, avec la disponibilité de plus d'une centaine de systèmes sur le marché. Parallèlement, de nouvelles techniques étaient en plein développement dans des domaines connexes tels que la pédologie, l'hydrographie, la topographie, la photogrammétrie et la télédétection. Dans un premier temps, le développement rapide de ces nouvelles techniques, combiné à l'immaturité du secteur, a entraîné une duplication d'efforts entre les disciplines similaires, sans une réelle coordination. Cependant, à mesure que les systèmes se multipliaient et que l'expérience s'accumulait, le potentiel de connecter les différents processus de traitement des données spatiales devenait évident. C'est ainsi qu'a émergé un nouveau domaine : celui des systèmes d'information géographique, qui est largement utilisé de nos jours.

Au début des années 80, à mesure que l'information devenait à la fois plus sophistiquée grâce à la miniaturisation et à l'augmentation des capacités de calcul, et plus accessible en raison de l'émergence d'ordinateurs à des prix abordables, les systèmes d'information géographique (SIG) tiraient parti de cette démocratisation des plates-formes informatiques. De nos jours, les SIG sont employés par tous les intervenants dans le domaine de l'aménagement du territoire. (Houci,2011)

II.2.2. Définition d'système d'information géographique

Le système d'information géographique (SIG), qui s'appuie sur une base de données spatiale, vise à répondre à des requêtes à caractère géographique par le biais de diverses manipulations, telles que le tri, la recherche sélective, les calculs, l'analyse spatiale et la modélisation. Il peut être désigné par l'acronyme SIG (système d'information géographique) ou SIT (Systèmes d'Information du Territoire), et sa définition englobe :

Le système d'information géographique (SIG) est défini comme un système dédié à l'acquisition, à la gestion, à l'analyse et à la représentation des données. Il est spécialement conçu pour traiter des entités ayant des références géographiques, c'est-à-dire dont les

coordonnées x (longitudes), y (latitudes) voire z (altitudes), sont connues selon une projection spécifique (comme Lambert, etc.).

Le SIG est une méthode d'enregistrement, de gestion et d'extraction d'informations liées à l'environnement terrestre et possédant une structure organisée. Ces informations sont notamment définies par leurs paramètres de localisation spatiale, ce qui permet leur manipulation et leur cartographie de diverses manières (**Cours de bioclimatologie**).

Le terme "système d'information à référence spatiale" (SIRS) a été proposé comme une expression plus générique, et il s'est répandu en particulier au Canada. Cependant, le terme "système d'information du territoire" (SIT) est généralement employé dans les domaines du cadastre et de l'aménagement du territoire (**Cours de bioclimatologie**).

Qu'il soit désigné comme SIG, SIRS ou SIT, le système d'information géographique est une structure organisée comprenant des équipements informatiques, des logiciels, des données géographiques et des personnes compétentes pour saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et présenter divers types d'informations géographiquement référencées.

Un système d'information représente un élément artificiel greffé sur un élément naturel, pouvant également s'appliquer à une organisation. Il est conçu pour enregistrer un ensemble d'images de l'objet réel à différents moments de son existence. Ainsi, il se présente comme une extension de la mémoire humaine, qui augmente la capacité de mémorisation des intervenants et facilite leur processus décisionnel (**Ider.K, 2004**).

II.2.3. Données géographique

II.2.3.1. Système de coordonnées

Une structure de référence fixe, située en superposition sur la surface d'une zone, permet d'indiquer la position d'un point. Un système de référence se compose d'un ensemble de points, de lignes et/ou de surfaces, ainsi que d'un ensemble de règles qui définissent les positions des points dans l'espace en deux ou trois dimensions. Les systèmes de coordonnées cartésiennes et les systèmes de coordonnées géographiques utilisés à la surface de la Terre sont des exemples fréquents de systèmes de coordonnées (**ESRI, 2004**).

II.2.3.2. Projection d'une carte

Une projection cartographique représente un objet tridimensionnel, comme le globe terrestre, sous une forme bidimensionnelle. La projection cartographique est en fait l'élément le plus complexe du système de coordonnées de référence, car elle offre un degré élevé de flexibilité (**Galatia, 2006**). Ainsi, la procédure mathématique qui permet de convertir l'ellipsoïde en plan est appelée système de projection ou simplement projection.

II.2.3.2.1. Échelle

L'échelle d'une carte représente le rapport constant entre les longueurs indiquées sur la carte et les longueurs correspondantes mesurées sur le terrain. L'échelle est généralement exprimée sous forme d'une fraction, par exemple 1/50 000. Cela signifie que 1 mètre sur la carte équivaut à 50 000 millimètres, soit 50 mètres sur le terrain (**Ougrine, 2003**).

II.2.3.3. Mode raster

Un des types de données géospatiales est désigné sous le terme de données raster / matricielles, plus couramment appelées "rasters". Les formes les plus facilement identifiables de données raster comprennent les images satellites numériques ainsi que les photographies aériennes. Les ombres des pentes et les modèles numériques de terrain sont également représentés en raster. Toute forme de données cartographiques peut être représentée sous forme de données raster, mais il existe des limitations. Un raster est une grille régulière composée de cellules ou, dans le contexte de l'imagerie, de pixels. Il est défini par un nombre spécifique de lignes et de colonnes, chaque cellule possédant une valeur numérique et une taille géographique particulière (**Athan, 2010**).

II.2.3.4. Mode vecteur

Pour représenter les objets à la surface de la Terre, les SIG utilisent trois éléments géométriques fondamentaux : le point, la ligne et la surface (**IAAT, 2003**).

- Le point (utilisé pour représenter à grande échelle des éléments tels que des arbres, des bornes d'incendie, des collecteurs d'ordures, etc. Il peut également symboliser une capitale régionale).
- La ligne (représente les réseaux de communication, d'énergie, hydrographiques, d'assainissement, etc.).
- La surface (présente la superficie d'une commune ou d'entités ayant une existence géographique, telles qu'une forêt, un lac, une zone bâtie, etc.).

L'intérêt particulier de ces données réside dans la possibilité de créer une cartographie thématique en sélectionnant uniquement les éléments désirés pour intégrer dans la base de données. Cependant, rapidement se pose la question de la complexité accrue de la structuration de la base de données. (**Fig.8, Fig.9**)

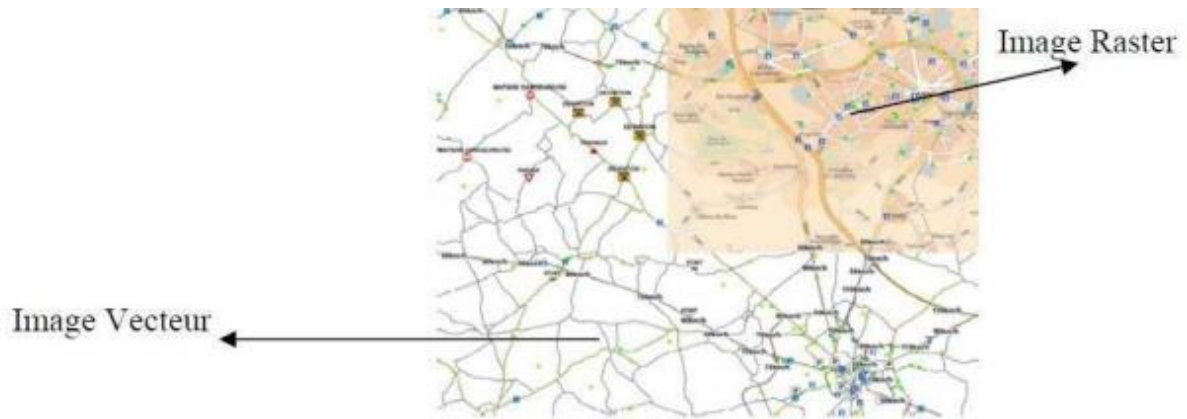


Figure 8: Mode Raster et Vecteur (Kharchi I et al ,2022).

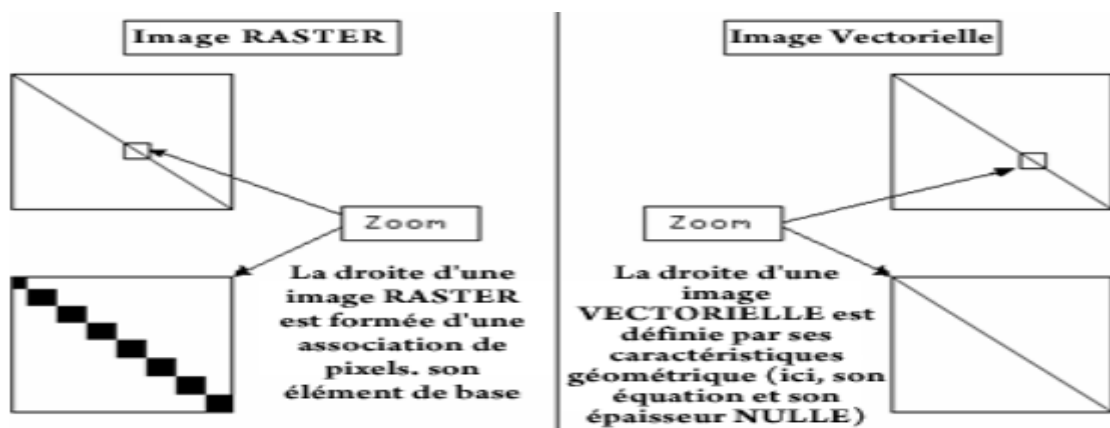


Figure 9: Représentation des images Raster et Vecteur (Kharchi I et al ,2022).

II.2.3.4.1. Notion de couche

Les données géographiques sont fréquemment structurées en couches thématiques à l'intérieur des SIG. À partir de diverses couches de base, contenant des informations regroupées selon une thématique définie, il est possible de générer une carte en combinant ces couches selon une méthode spécifique. Cela conduit à la création d'une couche résultante (Regagba, 1999 in Tadjeddine, 2001). (Fig.10).

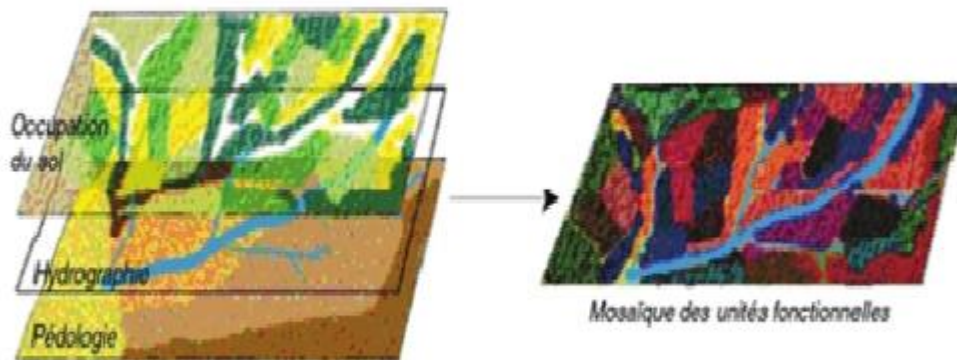


Figure 10: Principe de combinaison des caractéristiques en couches thématiques (DUCROT, 2005).

Selon (DYKSTRA,1996), les objectifs des SIG en foresterie peuvent être regroupés en deux catégories distinctes :

- L'extraction d'informations détaillées sur les forêts par le biais de la télédétection aéroportée ou satellitaire (occupation du sol, images radar, etc.).
- Le développement de méthodes pour intégrer des informations provenant de sources multiples dans les systèmes d'aide à la prise de décision en faveur du développement durable des forêts.

En matière de gestion forestière, les systèmes d'information géographique sont désormais des outils de premier choix dans divers domaines d'intervention :

- L'évaluation des impacts des aménagements tels que les postes de vigie, les maisons forestières, les points d'eau, les banquettes, etc.
- La gestion des réseaux de communication, essentielle notamment dans les opérations de lutte contre les incendies et d'exploitation du bois.
- La gestion des équipements et des ressources humaines.
- La création d'une base pour le plan cadastral forestier national.
- L'inventaire, la gestion des ressources forestières et la sylviculture.
- Le suivi des processus de désertification.
- La surveillance de l'état de santé des forêts (La protection des forêts contre les incendies).

II.2.3.5. Modèle numérique de terrain (MNT)

Pour réaliser la cartographie numérique du la ferme pilote Khebouzia, il est nécessaire d'intégrer les données contenant les informations relatives au relief, également désignées sous le nom de Modèle Numérique de Terrain (MNT). Ce dernier correspond à la représentation de valeurs d'altitudes continues sur une surface topographique, grâce à l'utilisation d'une matrice de valeurs Z référencées par rapport à un datum commun. Il est couramment employé pour représenter le relief d'un terrain (ARCGIS Guide de l'utilisateur, 2010).

II.2.3.5.1. Caractéristiques des MNT

Il existe diverses appellations pour le terme générique de MNT en fonction de la méthode de production employée pour l'obtenir. Dans le domaine terrestre, certains modélisent uniquement le sol (modèle numérique de terrain), tandis que d'autres intègrent également le sursol, incluant des éléments tels que la végétation ou les constructions (modèle numérique de surface, MNS, modèle numérique d'élévation, MNE.) (ARCGIS Guide de l'utilisateur, 2010).

Ces derniers sont généralement générés à partir de jeux de données brutes obtenus par des techniques comme le Lidar, la photogrammétrie ou la radiogrammétrie (**SHORT, 2000**). Les MNT sont souvent des dérivés de ces modèles, filtrés pour exclure tous les éléments constitutifs de la couverture topographique, ne laissant que le sol nu. L'expression "couverture topographique" englobe tous les éléments situés au-dessus de la surface terrestre continentale, tels que les bâtiments et la végétation dense, comme les forêts.

II.2.3.6. DEM (Digital Élévation Model)

Le MNT, ou Modèle Numérique de Terrain, est une représentation numérique des reliefs terrestres à différentes altitudes. Il constitue l'une des sorties essentielles d'un système d'information géographique (SIG), offrant la possibilité de visualiser en trois dimensions la région d'étude en prenant en compte les variations des coordonnées horizontales (x, y) et verticale (z), où (x, y) représentent les coordonnées horizontales et (z) représente la coordonnée verticale (l'altitude). Cette représentation tridimensionnelle peut également être simplifiée à l'aide d'outils informatiques (**Serrutum et Grossely, 1997**).

II.2.4. Composantes d'un SIG

Selon ESRI France (**ESRI, 2018**), un Système d'Information Géographique est composé de (**Fig.11**) :

A. Matériel informatique (hardware) : Les SIG fonctionnent sur une vaste gamme d'ordinateurs (PC de bureau connectés en réseau ou utilisés de manière autonome).

B. Logiciels (software) : Les logiciels SIG fournissent les outils nécessaires pour stocker, explorer et visualiser l'information géographique. Les principaux composants d'un logiciel SIG sont :

- Outils de saisie et de manipulation des informations géographiques et système de gestion de base de données.
- Outils géographiques pour les requêtes, l'analyse et la visualisation.
- Interface graphique utilisateur pour une utilisation conviviale.

C. Données (Information Géographique) : Les données représentent l'élément central des SIG. L'information géographique peut être soit générée en interne, soit obtenue auprès de producteurs de données.

D. Personnel qualifié : Étant avant tout des outils, les SIG nécessitent une expertise de la part de l'utilisateur pour leur exploitation. Il est important de souligner que les SIG sont conçus de manière à être accessibles à différents types d'utilisateurs, allant de ceux qui créent et maintiennent les systèmes, jusqu'aux utilisateurs de logiciels pour le traitement de

l'information géographique. De nos jours, avec l'essor des SIG sur Internet, le nombre d'utilisateurs de SIG connaît une croissance significative.



Figure 11: Schéma des composantes d'un SIG.

II.2.5. Fonctionnalités du S.I.G

Les SIG sont conçus pour répondre à une variété de besoins, et comme il n'existe pas de système standard, ils doivent être adaptés en fonction des objectifs établis. Cependant, il convient de noter que cinq fonctionnalités principales, appelées les "6A", doivent être assurées par tous les SIG (**Fig.12**) :

- **Abstraire** : Élaborer un modèle qui organise les données en composants géométriques et attributs descriptifs, tout en permettant d'établir des relations entre les objets.
- **Acquérir** : Le logiciel doit offrir des fonctionnalités de numérisation et d'importation de données.
- **Archiver** : Le logiciel doit être doté d'une grande capacité de stockage des données.
- **Analyser** : Capacité à analyser les données géographiques en utilisant des méthodes quantitatives et statistiques, ainsi que des opérateurs topologiques, entre autres.
- **Afficher** : Capacité à présenter l'information géographique sous forme de cartes, de tableaux, de graphiques, etc.
- **Anticipation prospective**.

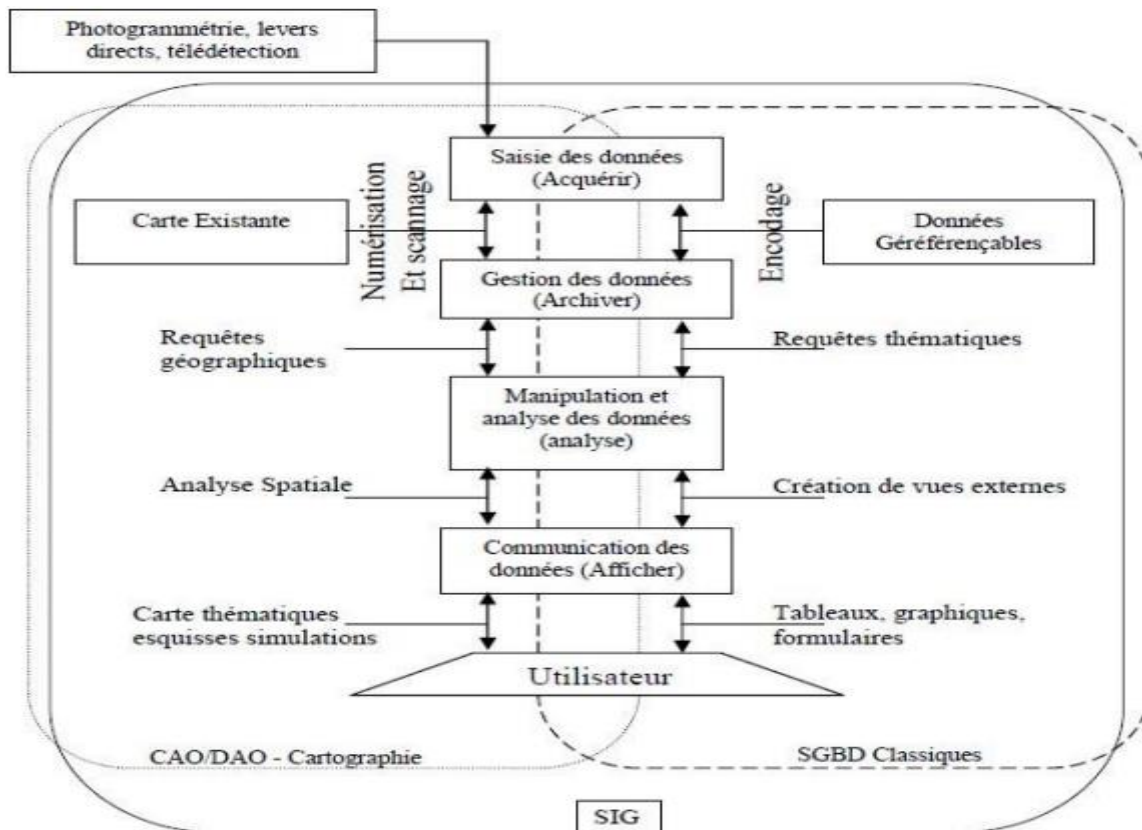


Figure 12: Les fonctionnalités du S.I.G (NOTTET, 2002).

II.2.6. Rôle des SIG

Le rôle du système d'information est de fournir une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial en se basant sur des primitives graphiques (vecteurs) ou des grilles (rasters). À ces primitives sont associées des informations qualitatives telles que la nature des éléments (routes, voies ferrées, forêts, etc.) ou toute autre information contextuelle (HAMENNI, N,2011).

Les fonctions fondamentales des SIG sont souvent regroupées sous l'acronyme "5A" :

- Acquisition : Alimenter le SIG en données. Cela implique la saisie à la fois de la forme géométrique des objets et de leurs attributs et relations.
- Archivage : Transférer les données de l'espace de travail vers un espace d'archivage, généralement un disque dur. Cette fonction dépend de l'architecture logicielle et de la présence éventuelle d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD).
- Analyse : Répondre aux questions posées en utilisant les fonctionnalités d'analyse géospatiale.
- Affichage : Produire automatiquement des cartes, percevoir les relations spatiales entre les objets et visualiser les données sur les écrans d'ordinateur.

- Abstraction : Concevoir un modèle qui organise les données en composantes géométriques et attributs descriptifs, et établir des relations entre les objets (I.A.A.T,2003).

Ces fonctions contribuent ensemble à la création, la gestion, l'analyse et la visualisation d'informations géographiques au sein d'un système d'information géographique.

II.2.7. Domaines d'application du SIG

Les domaines d'application des SIG englobent toutes les activités impliquant des données localisées. Outre les domaines évoqués ci-dessus, les applications des SIG incluent également :

- Tourisme : Gestion des infrastructures et des itinéraires touristiques.
- Marketing : Localisation des clients et analyse de sites.
- Planification urbaine : Cadastre, voirie, et réseaux d'assainissement.
- Protection civile : Gestion et prévention des catastrophes.
- Transport : Planification des transports urbains et optimisation des itinéraires.
- Hydrologie.
- Gestion forestière : Cartographie pour l'aménagement, la gestion des coupes et la sylviculture.
- Géologie : Cartographie, études des aléas, amiante environnemental, prospection minière.
- Biologie : Études des déplacements des populations animales.

Les SIG trouvent des applications dans une multitude de domaines, contribuant ainsi à la prise de décisions éclairées et à la compréhension approfondie de divers phénomènes géographiques et environnementaux (MAGUIRE D.J, et al., 1991).

Chapitre III : Matériel et méthodes

III.1. Présentation du la zone d'étude

III.1.1. Localisation géographique de la wilaya

La wilaya de Bouira a été créée par l'ordonnance n°74/69 du 02 juillet 1974, et elle s'étend sur une superficie de 4454 km². Située dans la région centre du pays, elle se trouve à 130 km au sud-est de la capitale. Géographiquement, elle est limitée par (fig.13) :

- Au Nord par Boumerdés et Tizi Ouzou.
- Au Sud et Sud-ouest par M'Sila et Médéa.
- A l'Est et SUD-EST par Blida et Bordj Bou Arreridj.
- A l'Ouest par Blida et Médéa (Boucheraïne K, HABET, 2022).

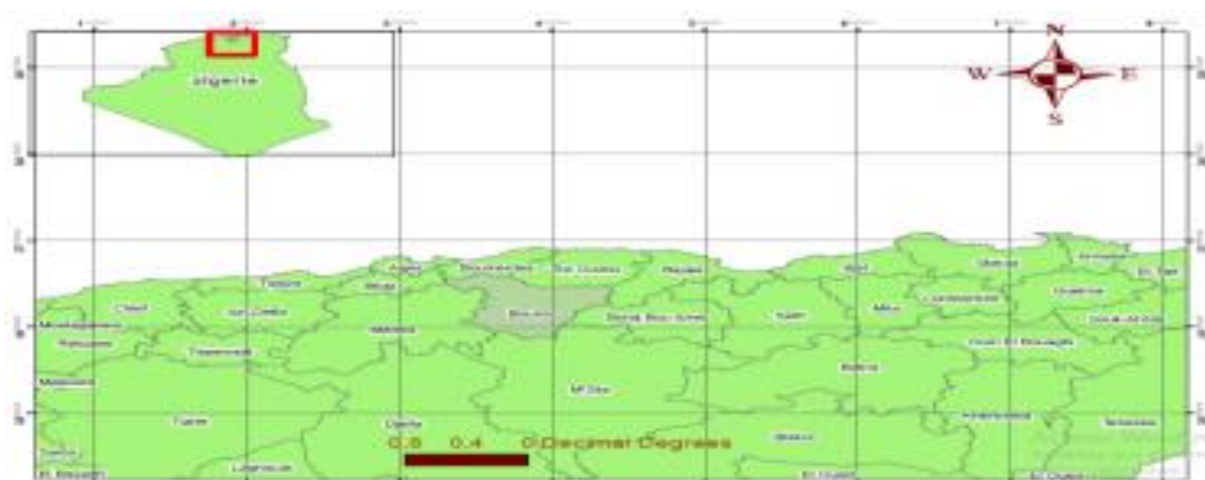


Figure 13: Carte de situation géographique du Bouira (photo originel Arc Mapp 10.7.1).

III.1.2. Présentation de La commune Khabouzia (ferme pilote BK)

La commune de al Khabouzia est localise de chef-lieu de wilaya de Bouira. Leur localisation géographique qui nous l'avons pris au arc gis 3.6015207, 36.3174072. Elle est limitée par (fig.14) :

- Au sud Birghbalou
- Au nord par Souk EL khmis,
- L'est par Ain Bessem
- L'ouest par el Azizia

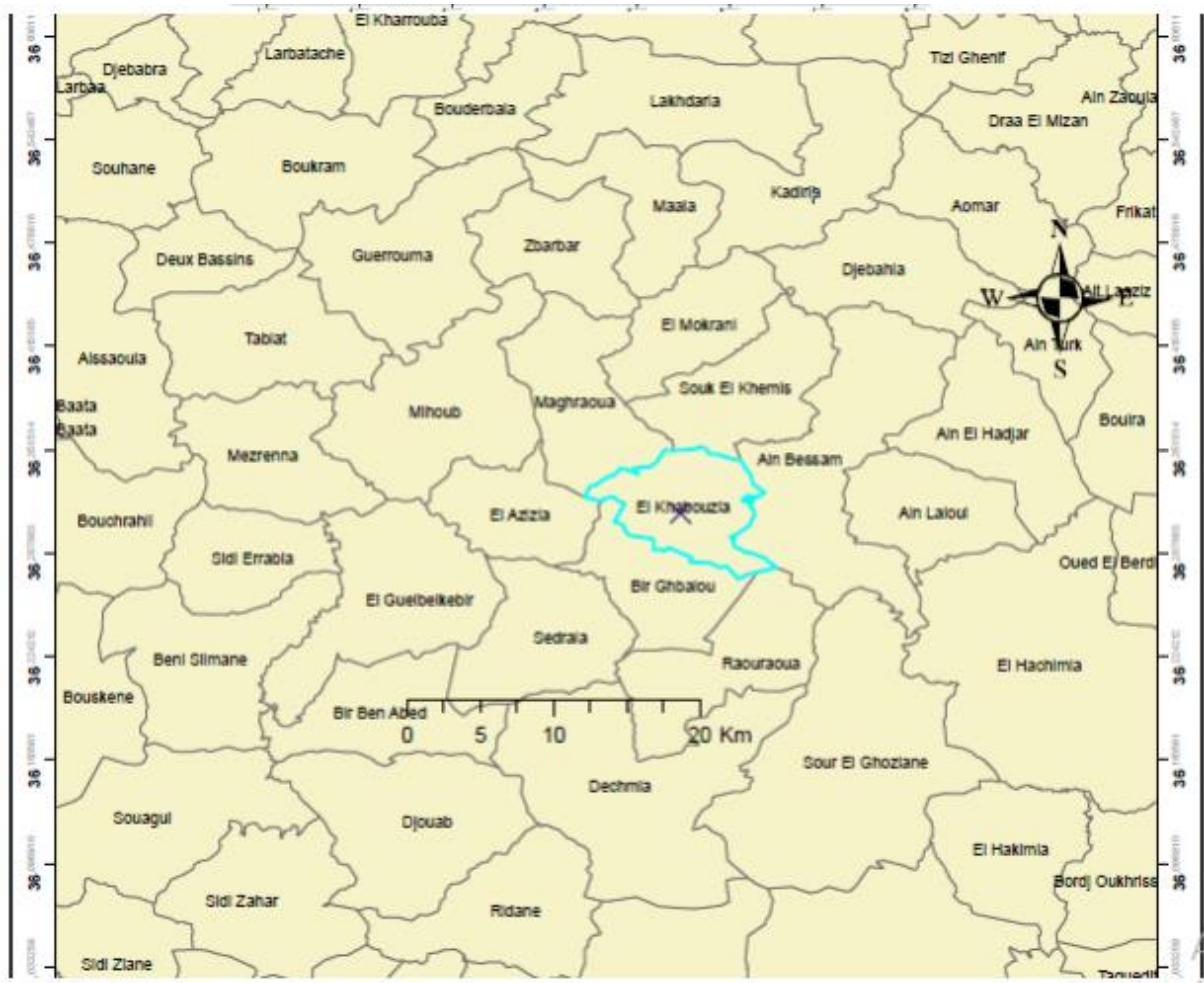


Figure 14: Carte de situation géographique du commune Ain Bessem (photo originel Arc Mapp 10.7.1).

Nous avant réalise l'échantillonnage dans la ferme pilote Boubker Saidi El Khabouzia au but de mesuré la fertilité du sol de cette ferme pilote qu'elle s'attendre sur une superficie de 1000ha.

III.1.2.1. Etude climatique de la wilaya du Bouira

Le climat présente des caractéristiques chaudes et sèches durant l'été, tandis qu'il devient froid et pluvieux en hiver. En moyenne, les précipitations atteignent 660 mm/an dans la partie nord et 400 mm/an dans la partie sud. Les variations de température sont notables, oscillant entre 20 et 40 °C de mai à septembre, et de 2 à 12 °C de janvier à mars.

III.1.2.1.1. Précipitation

La période la plus humide s'étend du 9 septembre au 28 mai, avec une probabilité de plus de 15 % qu'une journée donnée soit humide. La probabilité maximale d'une journée humide atteint 28 % le 7 février.

La saison plus sèche englobe la période du 28 mai au 9 septembre. La probabilité la plus faible d'une journée humide est de 3 % le 18 juillet.

Parmi les jours humides, nous pouvons distinguer ceux qui connaissent de la pluie seule, de la neige seule, ou un mélange des deux. En fonction de cette classification, la forme de précipitations la plus fréquente tout au long de l'année est la pluie seule, avec une probabilité maximale de 27 % le 20 novembre.

Les précipitations (**tableau 3**) constitue des données fondamentales pour caractériser le climat en wilaya du Bouira.

Tableau 3: la précipitation dans la wilaya du Bouira (2015-2021) (**direction hydraulique, 2023**).

l'année	septembre	Octobre	novembre	décembre	janvier	février	Mars
2015	38,1	23,9	27,3	0	31,8	50,5	132,2
2016	39,7	8,7	28,8	50,2	159,6	34,8	19,1
2017	12,6	19	72,6	44,3	25,8	43,4	95,1
2018	12,6	88,5	88,9	18,9	129,1	21,6	19,3
2019	34,7	4,8	121,1	21,8	46,9	0	45
2020	19,8	5,2	68,5	49,9	23,7	14,1	46,5
2021	25,7	18,2	118,7	41,5	10,6	28,2	55,9
l'année	avril	mai	juin	Juillet	aout	annuel	
2015	29,3	67,6	0	14,2	0	414,9	
2016	28,6	0	30	0	31,1	430,6	
2017	92,2	43,2	67,7	0	9,3	525,2	
2018	53,9	19,3	3,8	3,1	3,3	462,3	
2019	81	11,7	0	0	0	367	
2020	11	28,7	21,9	3,7	3,5	296,5	
2021	75,1	47,4	0	0	0	421,3	

D'après le tableau on remarque que les précipitations sont peu abondantes et irrégulières et déferrent entre une années et autres. On peut voir que l'année la plus élevé dans la quantité des précipitations c'est en 2017 (525.2mm).

Le maximum des pluies enregistre au mois de novembre (75.12mm) et le minimum en juillet (3mm).

III.2. Présentation lieu de stage

III.2.1. Groupe ASMIDAL

Asmidal a été créée le 1er septembre 1984, née d'une véritable passion pour la dynamique industrielle et économique, au service de l'agriculture et de l'économie nationale.

Depuis le 26 mai 2013, Asmidal a été établie en tant que groupe industriel spécialisé dans les engrais et les produits phytosanitaires. Elle est actuellement rattachée au groupe SONATRACH Holding, précisément à SONATRACH ALKIMYA Spa (SOALKIM), et joue

un rôle majeur dans les secteurs des engrais, des produits phytonutriments, des produits phytosanitaires et de la santé publique.

La direction générale du groupe ASFERTRADE est basée à Annaba. Le groupe Asmidal détient à 100 % les actions de ses filiales ASFERTRADE, ALPHYT et FERTIALE.

III.2.1.1. ASFERTRADE

La filiale spécialisée dans la formulation et la commercialisation des engrais solides, ASFERTRADE, répond aux besoins des agriculteurs en couvrant différentes régions :

- **À l'Est** : au niveau d'Annaba et à El Kherroubi.
- **Au centre** : à Bouira, où se trouve l'unité de formulation des engrais (Oued El Berdi), ainsi qu'à Gué de Constantine et à Ain Defla.
- **À l'Ouest** : à Oran, notamment au niveau du Petit Lac et à Es Senia.
- **Au Sud** : au centre de distribution des engrais liquides et solides à Sidi Okba, Biskra.

III.2.1.1.1. Activation de groupement d'ASFERTRADE

L'unité de formulation d'engrais solides par la méthode de Blandin est située dans la zone industrielle de Sidi Khaled, dans la commune d'Oued Berdi, relevant de la Daïra d'El Hachimia, dans la wilaya de Bouira.

Cette unité est spécialisée dans la formulation et la commercialisation d'engrais solides (**fig.15**). Elle propose également la possibilité de créer des formulations sur mesure en fonction des besoins spécifiques des cultures et des types de sols, afin d'assurer une fertilisation équilibrée.

L'unité est équipée d'un laboratoire pour les analyses chimiques des sols, et elle assure également le contrôle de qualité chimique et physique des matières premières ainsi que des produits finis (les engrais).

Nous avons effectué nos analyses chimiques des sols au sein de laboratoire de l'unité ASFERTRADE de la wilaya de Bouira.



Figure 15: les différents produits d'engrais (Photo originale).

III.3. Matériel et protocole expérimentale

Dans une étude de ce genre, il est toutefois essentiel de pouvoir analyser la qualité du sol et d'identifier les zones problématiques. Cette analyse nécessite la manipulation d'une quantité considérable d'informations pour décrire la qualité physico-chimique du sol de la ferme pilote Boubkeur Saidi. Pour ce faire, le recours à un système d'information géographique (SIG) s'avère particulièrement utile.

L'objectif de ce travail est d'étudier et d'évaluer la qualité de sol en utilisant des SIG et des images satellitaires. Ceci vise à mettre en place un système de surveillance spatiotemporelle ainsi que des outils de base qui contribueront à une gestion durable du patrimoine en question. Ces outils fourniront des éléments de réponse aux questions posées dans le cadre de la problématique de notre étude.

Afin d'aborder la problématique posée, le travail a été divisé en trois ateliers pratiques distincts :

1. Phase de terrain
2. Analyses au laboratoire
3. Cartographie des paramètres physico-chimiques

III.3.1. Phase terrain

III.3.1.1. Préparation de jour de la sortie

- La date de la sortie : le 06 mai 2023
- Lieu de la sortie : ferme pilote Boubker Saidi
- La durée de la sortie : 3h de 12h à 15h

Nous avons effectué un échantillonnage sur une parcelle de 1000 hectares en utilisant la méthode de la parcelle. À chaque point d'échantillonnage, un prélèvement a été effectué à une profondeur de 25 cm du sol de la ferme. Nous avons utilisé le matériel nécessaire pour ce processus, notamment une tarière, des bidons, des sacs et des étiquettes. (Fig.16)



Figure 16: le matériel et les étapes d'échantillonnage sur le terrain (photo originale).

III.3.1.1.1. Campagnes de prélèvement et mesure in-situ

Pendant la réalisation de cette étude, nous avons utilisé une approche d'échantillonnage systématique homogène, en prélevant des échantillons à intervalles réguliers de 65m^2 . Cela nous a permis de collecter un total de quinze (15) échantillons. De plus, nous avons effectué des mesures in situ à chaque point de prélèvement dans les quinze stations d'échantillonnage.

III.3.1.1.2. Equipements et méthodes de mesure



Figure 17: Palin test pour les analyses chimiques (photo original).

Pour collecter les échantillons de sol, nous avons parcouru la longueur de la parcelle et prélevé quantitativement des échantillons in situ. Chaque échantillon a été placé dans un sac plastique pesant entre 500g et 1kg. Nous avons effectué ces prélèvements à une profondeur in situ de 30cm à 50cm. Par la suite, les échantillons ont été soumis à des analyses physiques au laboratoire de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie (SNV), ainsi qu'à des analyses chimiques multi-paramètres au laboratoire de l'unité ASFERTRADE à Oued El Berdi.

III.3.2. L'analyse au laboratoire

III.3.2.1. Préparation d'échantillonnages

L'étude morphologique du sol est réalisée par l'analyse et la mesure des échantillons prélevés. Pour ce faire, les échantillons sont envoyés aux laboratoires pour des analyses approfondies. La comparaison des résultats morphologiques et analytiques permet une exploitation complète des données d'un point de vue pratique.

Les échantillons recueillis sont soigneusement étiquetés et scellés dans des sacs appropriés. Ils sont ensuite acheminés vers un laboratoire en vue des analyses. La préparation des échantillons de sol pour les différentes analyses revêt une importance cruciale afin d'obtenir des résultats précis. Ainsi, il convient de suivre les étapes suivantes :

- Pour faciliter le processus, nous avons dû séparer les gros granulats, les pierres et les cailloux du reste du matériau prélevé.

- Nous avons ensuite utilisé un rouleau pour briser les particules agglomérées. Les échantillons prélevés ont été étalés sur du papier journal et laissés sécher jusqu'à ce qu'ils perdent toute leur humidité naturelle.
- Après le séchage, nous avons effectué un tamisage des échantillons à l'aide d'un tamis de 2 mm (**Fig.18**). Cette étape a permis de séparer les particules fines du sol, qui sont ensuite prêtes à être utilisées au laboratoire.



Figure 18: Opération de tamisage pour obtenir la terre fine (**Photo originale**).

Les analyses réalisées comprennent la mesure du pH du sol, la détermination des teneurs en calcaire total, la mesure de la conductivité électrique, ainsi que l'évaluation des éléments présents dans le sol tels que la matière organique, accompagnée de la mesure de l'humidité du sol.

III.3.2.2. Dosage du calcaire total dans le sol

III.3.2.2.1. Matérielle

- Calcimètre de Bernard : (constituant graduée, deux tubes souples, ampoule, erlenmeyer)
- Na Cl
- H Cl

- Échantillon du sol séché
- Balance
- Seringue
- La fiche du résultat
- Crayon ou stylo

III.3.2.2.2. Mode d'emploi

Tout d'abord, nous avons introduit 0,3 g de carbonate de calcium pur et sec dans un erlenmeyer. Ensuite, nous avons ajouté 5 ml d'acide chlorhydrique (HCl) 6N et 50% d'eau distillée dans un petit tube, que nous avons introduit dans l'erlenmeyer sans faire couler l'acide. Après avoir soigneusement fermé l'erlenmeyer et l'avoir relié au calcimètre avec la pince ouverte, nous avons ajusté la position de l'ampoule à ce niveau. En inclinant l'erlenmeyer, nous avons versé l'HCl sur le CaCO₃, agité pour favoriser la réaction, et le CO₂ dégagé a comprimé le liquide dans la colonne (**fig.19**). Ensuite, nous avons abaissé l'ampoule mobile et ramené le liquide dans l'ampoule et dans la colonne au même niveau. Enfin, nous avons enregistré le volume en ml du CO₂ dégagé (V) (**Rahmouni, 2021**).

❖ La loi applique dans les mesures :

%de CaCO₃ totale de l'échantillon= $v' \cdot 0.3 \cdot 100 / v$ *



Figure 19: les étapes du détermine dosage du calcaire d'échantillonne (photo originale).

III.3.2.3. Perméabilité du sol

III.3.2.3.1. Matérielle

- 2 Bechar
- Échantillonne du sol
- Gravière
- Une règle
- Crayon ou stylo
- Fiche du résultat
- La tête constante
- La balance

III.3.2.3.2. Test de détermination du coefficient de transmission à tension constante

Afin de déterminer le coefficient de perméabilité pour tous les sols à gros grains, nous avons utilisé la méthode de la tête constante pour tester la récupération avec une tension constante. L'appareil que nous avons utilisé est constitué d'une cellule contenant l'échantillon de sol, reliée à un réservoir d'eau en hauteur contenant de l'eau à un niveau constant dans la

cellule (fig. 24). La charge constante est mesurée à l'aide de deux tubes sortant du haut et du bas. L'échantillon inclus dans le coefficient de perméabilité signifie que :

$K=Q.I/A.h$ ou $K=V.I/A.t.h$ / Q ou V/t : drainage (Abdel Fatah, mécanique du sol)



Figure 20: cellule constant (photo originale).

III.3.2.4. Texture du sol

III.3.2.4.1. Matérielles

- Échantillonne du sol
- L'eau
- Crayon ou stylo
- Fiche du résultat

III.3.2.4.2. Application de la texture

La "méthode du boudin" (fig.21) est le moyen le plus simple pour déterminer la texture du sol d'un champ. Cette méthode implique le pétrissage d'une petite portion de terre (quelques centimètres) entre le pouce et le majeur. Il est important de retirer tous les éléments rugueux tels que les débris, les racines et les cailloux, afin d'obtenir une masse de pâte uniforme (fig. A). Les pédologues déduisent la texture du sol en se basant sur des sensations visuelles, tactiles et auditives (Feller C. et al., 2016 b).

Lorsque le sol est trop sec, il est nécessaire d'ajouter un peu d'eau. En revanche, si le sol semble "brillant" lorsqu'il est mélangé, il ne peut pas être testé s'il est trop humide (Feller C et al., 2016c).

La démarche pratique implique la tentative de former un boudin d'une longueur de 05 à 10 cm et d'un diamètre (**fig. B**) d'environ 5 mm en roulant la pâte broyée entre les mains. Si la pâte colle aux doigts pendant le pétrissage et si elle peut être modelée en une saucisse, alors le sol contient plus de 15% d'argile. Cette saucisse présentera une certaine élasticité. Ensuite, il s'agit de tordre le boudin pour former un anneau. Si le boudin se casse lors de cet essai (**fig. C**), cela indique une teneur en argile comprise entre 15% et 30%. En revanche, si le boudin ne se casse pas et peut être fermé pour former un anneau (**fig. D**), cela signifie une teneur en argile supérieure à 30% (**Feller C et al., 2016 d**).

Si le sol contient une proportion significative de limon, il sera doux au toucher et semblable à de la craie. Dans ce cas, la pâte sera facilement étirable mais non plastique, ce qui signifie qu'il sera difficile de former un boudin fin, et celui-ci se brisera lorsque vous tenterez de le plier. De plus, il se désintégrera après quelques minutes, laissant des résidus sur les mains (**Feller C et al., 2016 e**).

Enfin, si le sol est principalement composé de sable (grossier ou fin), il s'effondrera complètement sous vos doigts et il sera impossible de former un boudin. Le sable sera rugueux au toucher et pourrait gratter les doigts en croisant ces différentes informations, les pédologues évaluent les fractions d'argile, de limon et de sable dans le pâton (**fig. 22**), ce qui leur permet de déterminer la classe texturale du sol. Cette démarche, basée sur l'analyse mécanique des échantillons en laboratoire, confirme la validité initiale de ce test sur le terrain (**Feller C et al., 2016 g**).

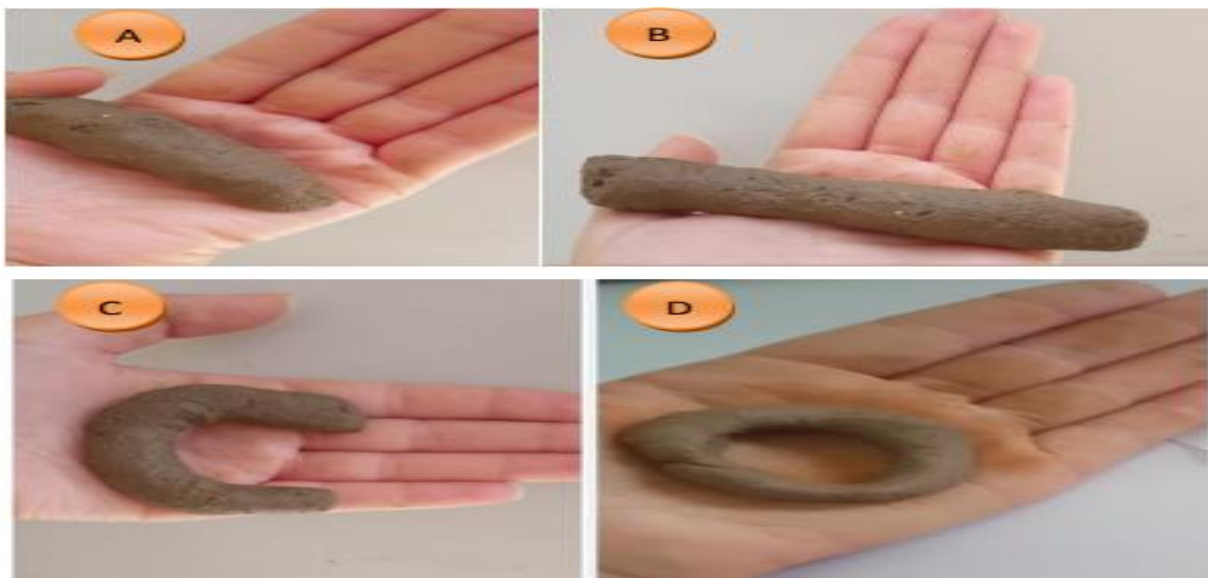


Figure 21: la méthode du boudin (photo originale).



Figure 22: les trois fractions du sol (photo originelle).

III.3.2.5. L'humidité du sol

III.3.2.5.1. Matérielles

- Récipients
- Four avec contrôle de températures (étuve)
- La balance
- Étiquette
- Échantillonne du sol
- Fiche de résultat
- Crayon ou style

III.3.2.5.2. Mode d'emploi

- Peser le récipient (M1) en le couvrant. Étiquetez-le soigneusement.
- Placez l'échantillon à l'état naturel dans le récipient et pesez l'ensemble (échantillon + récipient) (M2). Pour préserver l'humidité de l'échantillon, il est recommandé de maintenir le récipient fermé.
- Introduisez l'ensemble (échantillon + récipient) dans une étuve réglée à une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- Assurez-vous de retirer le couvercle une fois le récipient placé dans l'étuve.
- Après 24 heures, retirez le récipient avec du sol sèche. Fermer le couvercle et pesez avec la même balance (**fig.23**) (M3).
- Déterminer le taux d'humidité W en pourcentage (**Laboratoire mécanique du sol, 2018**).

$$W = \frac{M2 - M3}{M3 - M1} * 100$$

M1 : Masse du récipient.

M2 : Masse du récipient + Masse du sol humide.

M3 : Masse du récipient + Masse du sol sec.



Figure 23: les étapes de la mesure l'humidité (photo originelle).

III.3.2.6. Matière organique du sol

III.3.2.6.1. Matérielle

- Four a moufle
- Étuve
- Creuset de parcellaire
- Échantillonne du sol
- Marquer
- Crayon ou stylo
- Fiche du résultat
- Balance

III.3.2.6.2. Mode d'emploi

Pour déterminer la teneur en matière organique dans les échantillons de sol, nous avons suivi une série d'étapes précises. Tout d'abord, nous avons séché les échantillons de sol

pendant une période de 16 heures à une température de 150 °C. Ensuite, nous avons procédé au nettoyage des creusets en les chauffant jusqu'à ce qu'ils atteignent une couleur rouge. Après avoir pesé le creuset vide, nous avons ajouté 10 g de sol séché et enregistré le poids final.

L'étape suivante consistait à calciner le sol dans un four à moufle, maintenu à une température de 375 °C, pendant une durée de 16 heures. Une fois cette étape terminée, nous avons laissé le creuset contenant les cendres refroidir dans un dessiccateur. Enfin, nous avons procédé à la mesure du poids du creuset contenant les cendres, ce qui nous a permis de déterminer la teneur en matière organique de l'échantillon de sol analysé (**fig.24**). Ces étapes rigoureuses ont été entreprises afin d'obtenir des données précises et fiables pour évaluer la composition en matière organique du sol. (Québec, 2003).



Figure 24: les étapes mesurent la matière organique (photo originale).

III.3.2.7. pH du sol

III.3.2.7.1. Matérielle

- Échantillonnée sol séché et tamisé
- Multi paramètre

- Eau distillée
- Bécher 10 ml
- Cuillères de sol (2ml)

III.3.2.7.2. Mode d'emploi

Tout d'abord, 10 ml d'eau distillée ont été ajoutés dans un bécher. Ensuite, 2 cuillères de sol (équivalent à environ 2 ml) ont été introduites dans le bécher contenant l'eau distillée. Après avoir ajouté le sol, le mélange a été soigneusement agité pendant environ 1 minute.

Une fois le mélange agité, nous avons procédé à la mesure en utilisant un appareil de multi-paramètres (**fig.25**) au laboratoire d'Asfertrade, Ces étapes ont été suivies afin de déterminer certaines propriétés du sol de manière précise et fiable (**Laboratoire Asfertrade, 2023**).



Figure 25: Multi paramètre du sol (photo originale).

III.3.2.8. Conductivité électrique du sol (CE)

III.3.2.8.1. Matérielle

- Échantillonnée sol séché et tamisé
- Multi paramètre
- Eau distillée

- Bécher 10 ml
- Cuillères de sol (10ml)

III.3.2.8.2. Mode d'emploi

Tout d'abord, 50 ml d'eau distillée ont été versés dans un bécher. Ensuite, une cuillère de sol équivalant à 10 ml a été ajoutée dans le bécher contenant l'eau distillée. Après l'ajout du sol, le mélange a été agité de manière rigoureuse pendant une durée de 2 minutes.

Une fois le mélange soigneusement agité, nous avons procédé à la mesure en utilisant un appareil de multi-paramètres (**fig.25**) au laboratoire. Ces étapes ont été suivies afin d'obtenir des résultats précis et fiables concernant la CE du sol. (**Laboratoire Asfertrade, 2023**)

III.3.2.9. Analyse des éléments du sol

III.3.2.9.1. Matérielles

- 50ml l'eau distillée
- Les extrais (A, P, C) (**fig.26**)
- Papier filtre
- 6 Bechar
- Crayon ou stylo
- Cronos
- Cuillère 2ml
- Cuillère 10ml
- Fiche de résultat
- Complément spéciale du chèque élément (**fig.27**).
- Palintest soiltest10
- Echantillonnée du sol
- Entonnoir
- Tube 10ml (**Laboratoire Asfertrade, 2023**)



Figure 26: les différents extrais du sol (Photo originale).



Figure 27: les compléments spécialisés de chaque élément (Photo originale).

III.3.2.9.2. Analyse Cu du sol

III.3.2.9.2.1. Mode d'emploi

Dans un premier temps, 50 ml d'eau distillée ont été ajoutés au bécher. Ensuite, cinq extraits C ont été introduits, suivis d'une agitation appropriée. Après cela, 10 ml de l'échantillon de sol ont été incorporés et soigneusement mélangés pendant deux minutes. La solution obtenue a été filtrée et utilisée pour remplir un tube de 10 ml. Par la suite, un comprimé de Coppercol (N°1 et N°2) a été ajouté et broyé dans le mélange. Enfin, la mesure a été effectuée à l'aide du Palintest Soiltest10 pour obtenir des données précises et fiables. Ces étapes ont été rigoureusement suivies pour garantir l'exactitude des résultats obtenus lors de l'analyse.

III.3.2.9.3. Analyse Fe du sol**III.3.2.9.3.1. Mode d'emploi**

Pour commencer, 50 ml d'eau distillée ont été versés dans un bécher. Par la suite, cinq extraits C ont été introduits et soigneusement mélangés en agitant la solution. Suite à cela, 10 ml de l'échantillon de sol ont été ajoutés au mélange et agités pendant deux minutes. La solution obtenue a été filtrée et utilisée pour remplir un tube de 10 ml. Ensuite, un comprimé de fer (N°1 et N°2) a été ajouté à la solution, soigneusement broyé et laissé à reposer pendant 10 minutes. À la fin de cette période d'attente, la mesure a été effectuée à l'aide du Palintest Soiltest10.

III.3.2.9.4. Analyse P du sol**III.3.2.9.4.1. Mode d'emploi**

Dans un premier temps, 50 ml d'eau distillée ont été versés dans un bécher. Par la suite, cinq extraits P ont été incorporés et soigneusement mélangés en agitant la solution. Ensuite, 2 ml de l'échantillon de sol ont été ajoutés au mélange et agités pendant une minute. La solution obtenue a été filtrée et utilisée pour remplir un tube de 2 ml, complété jusqu'à 10 ml avec de l'eau distillée. Par la suite, un comprimé acidifiant a été ajouté, ainsi qu'un comprimé de phosphate, le tout soigneusement broyé. Un temps d'attente de 10 minutes a été respecté avant de procéder à la mesure à l'aide du Palintest Soiltest10.

III.3.2.9.5. Analyse AL du sol**III.3.2.9.5.1. Mode d'emploi**

Initialement, 50 ml d'eau distillée ont été versés dans un bécher, suivi de l'ajout de cinq extraits A, soigneusement mélangés par agitation. Ensuite, 10 ml de l'échantillon de sol ont été incorporés à la solution et agités pendant deux minutes. La solution a été filtrée pour remplir un tube de 10 ml avec la solution filtrée obtenue. Par la suite, un comprimé d'aluminium (N°1 et N°2) a été ajouté et minutieusement broyé. Après un temps d'attente de 5 minutes, la mesure a été effectuée à l'aide du Palintest Soiltest10.

III.3.2.9.6. Analyse NH₃- du sol**III.3.2.9.6.1. Mode d'emploi**

D'abord, 50 ml d'eau distillée ont été versés dans un bécher, suivi de l'ajout de cinq extraits A, soigneusement mélangés par agitation. Par la suite, 10 ml de l'échantillon de sol ont été incorporés à la solution et agités pendant deux minutes. La solution a ensuite été filtrée pour remplir un tube de 10 ml avec la solution filtrée obtenue. Ensuite, un comprimé

d'ammoniac (N°1 et N°2) a été ajouté et minutieusement broyé. Après une période d'attente de 15 minutes, la mesure a été effectuée en utilisant le Palintest Soiltest10

Tous ces éléments (AL, Cu, Fe, NH₃-, P) on les mêmes étapes des analyses (**fig. 28**) (Laboratoire Asfertrade, 2023).



Figure 28: les étapes d'analyses des éléments du sol (Photo originale).

III.3.2.10. La couleur du sol

La détermination de la couleur du sol a été réalisée en comparant l'échantillon de sol avec l'échelle de couleurs standard de sols Mansell (**fig.29**). Cette échelle de Mansell comprend cinq couleurs de référence, chacune symbolisée par un nom anglais : Rouge (R), Jaune (Y), Vert (G), Bleu (B), et Pourpre (P). Il est important de noter que des couleurs complémentaires intermédiaires existent également, telles que YR, GY, BG, PB, et RP. Chaque couleur est graduée de 0 à 10, avec la couleur principale située à 5.

La charte de couleurs de Munsell est basée sur trois variables principales : la teinte (hue), la luminosité (value), et la saturation (chroma). En utilisant cette échelle, nous avons pu attribuer une couleur spécifique à l'échantillon de sol, en prenant en compte ces variables pour obtenir une représentation précise de la couleur du sol analysé.



Figure 29: Charte de Munsell (Photo originale).

III.4. Analyses physico-chimiques du sol par cartographie

III.4.1. Logicielle utilisée (Arc Mapp 10.7.1)

On peut résumer les principes caractérisés de ce logiciel comme suit :

- Opération de superposition de couches thématiques
- Traitement statistique
- Échange de données avec d'autres SIG (Arc Info, MapInfo)
- Disponibilité des symboles cartographiques, des cadres et des bibliothèques de légendes modifiable de manière interactive.
- Efficacité de la gestion de la base de données.

Un langage de requête qui permet de mélanger des entrées graphiques et non graphiques.

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Estimation des paramètres physico-chimiques des sols (ferme pilote)

En appliquant les protocoles expérimentaux détaillés dans le chapitre III, nous avons mené une analyse des sols de la ferme pilote BK Khabouzia à Bouira pour déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques. Les résultats des paramètres mesurés sur le terrain ainsi que ceux obtenus en laboratoire sont compilés dans (**tableau 3**). La représentation graphique de chaque paramètre nous permet d'examiner les variations et les évolutions spécifiques à chaque site de prélèvement, ouvrant ainsi la voie à une discussion approfondie.

Tableau 4: Résultats des paramètres mesurés (pH, CE, perméabilité, M.O, L'humidité, Les éléments du sol (Cu, Al, Fe, NH₃-, P), texture, la couleur,) pour les (15) échantillonne.

	l'altitude	longitude	ph du sol	CE du sol	% d'humidité	% du MO	%d'calcaire	perméabilité
E1	3,59541	36,31287	7,56	210	5,6	15,5	6	0,0063
E2	3,59488	36,31183	7,84	119,9	7,9	16,1	27	0,0019
E3	3,59482	36,31102	7,8	107,3	5,1	13,2	3	0,011
E4	3,58578	36,30728	6,78	1325	8,3	18,3	24	0,0042
E5	3,59457	36,30889	7,04	152,3	3,3	10,1	45	0,00061
E6	3,59459	36,31106	7,59	255	6,9	15,3	18	0,0045
E7	3,6068	36,30122	7,87	197	3,2	12,46	54	0,0016
E8	3,58458	36,31005	7,27	14,4	6,6	13,6	42	0,012
E9	3,58543	36,30839	7,27	89,2	6	13,9	9	0,012
E10	3,60441	36,30223	7,16	140	9,5	19,2	36	0,024
E11	3,60635	36,30146	6,39	137	10,9	19,7	33	0,023
E12	3,60736	36,3011	6,32	124,6	12	20,2	3,6	0,034
E13	3,60774	36,30074	7,28	101,9	7,2	17,9	3,3	0,0087
E14	3,58458	36,31005	6,93	103,1	7,1	14,8	6	0,01
E15	/	/	6,99	73,7	8,9	16	1,5	0,01
la moyenne	3,59623	36,30701	7,206	210,02	7,23	15,75	20,76	0,0109
l'initiale	3,58458	36,0074	7,87	14,4	3,2	10,1	1,5	0,0087
le max	3,6774	36,31287	6,32	1325	10,9	18,3	54	0,01
	P du sol	NH ₃ -	AL du sol	Cu du sol	Fe du sol	la couleur	la texture du sol	
E1	90	<<	13	2,2	6	10YR 4/3	argileux limoneux	
E2	15	7	7,1	15	5,6	10YR 6/3	argileux limoneux	
E3	250	/	7,1	8,6	/	10YR 5/3	argileux sableuse	
E4	1780	/	<<	0		10YR 4/3	argileux limoneux	
E5	25	12,5	<<	13,8	2,2	10YR 5/4	argileux sableuse	

E6	560	/	3,1	3,8	/	10YR 3/3	limoneux argileux
E7	50	/	0,4	0,6	/	10YR5/4	limoneux sableuse
E8	8	6,5	4,6	14,4	13,7	7,5YR 4/4	sableux limoneux
E9	175	56	<<	2,2	6,7	10YR 5/3	limoneux sableuse
E10	25	36	55	2,4	7	10YR 3/2	limoneux sableuse
E11	100	<<	<<	3,4	3,8	10YR 4/3	limoneux sableuse
E12	85	15	<<	15	9,8	10YR 3/4	argileux limoneux
E13	430	19,3	<<	17	7	10YR 5/3	argileux sableuse
E14	195	14,5	29,9	16	13,7	10YR 4/3	limoneux sableuse
E15	285	/	8,5	12	/	10YR 4/3	argileux sableuse
la moyenne	271,53	20,85	14,3	8,42	7,55	/	//////////
l'initiale	8	7	0,4	0,6	2,2	/	//////////
le max	1780	19,3	55	16	13,7	/	//////////

IV.1.1. Présentation des paramètres mesurés in-situ (pH, CE, perméabilité, M.O, L'humidité, Les éléments du sol (Cu, Al, Fe, NH₃⁻, P), texture, la couleur)

IV.1.1.1. Variation de Potentille Hydrique de sol dans la ferme pilote (BK)

Le pH du sol constitue le premier indicateur de l'évolution physico-chimique du sol. Sa valeur est essentielle pour la disponibilité des éléments nutritifs nécessaires à la croissance et au développement des plantes (Konfe, Z et al., 2019). En réalité, la plupart des paramètres physico-chimiques du sol sont étroitement liés à son pH. L'évaluation du pH des sols de la parcelle de la ferme pilote BK nous a permis d'obtenir les résultats présentés (fig.30).

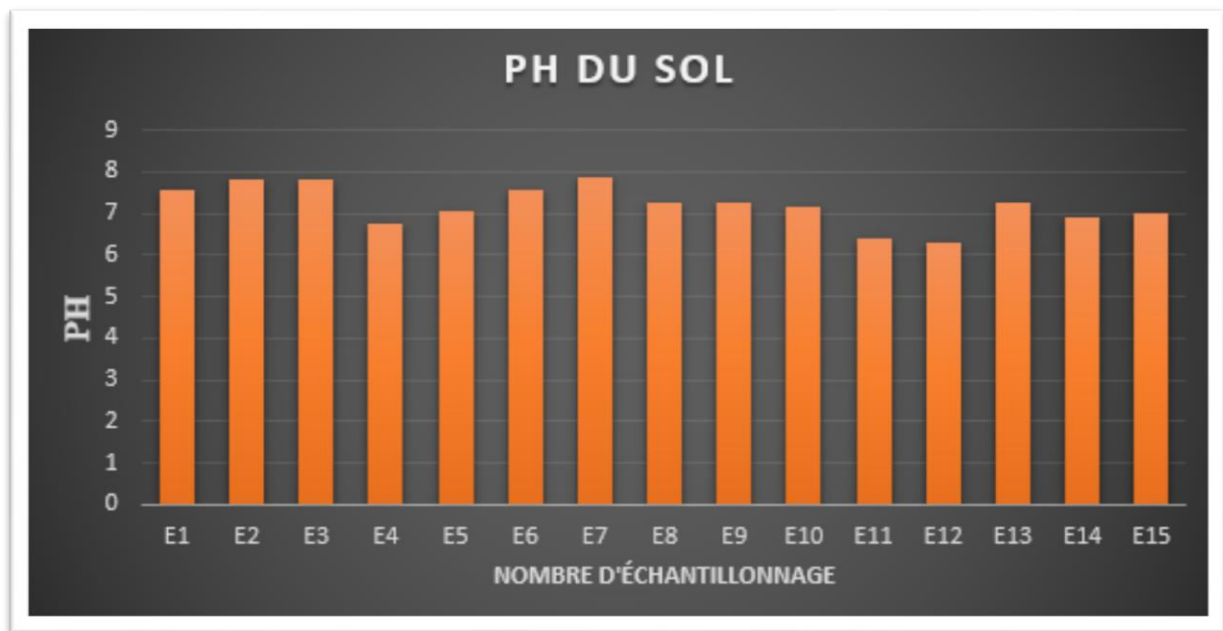


Figure 30: Histogramme de la variation de pH des 15 échantillons mesurés (photo originale).

D'après l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, il est observé que le pH varie légèrement parmi les 15 échantillons, oscillant entre 6,32 (échantillon 12) et 7,87, qui représente le maximum enregistré à l'échantillon 7. La moyenne du pH est de 7,21. Ces valeurs de pH se situent près de la neutralité du pH (Annexe1) où la plage moyenne du pH neutre se situe entre 6,5 et 7,5.

En examinant les résultats obtenus pour le pH, il est possible d'observer que certains échantillons présentent des valeurs de pH légèrement supérieures à 7,5 et d'autres légèrement inférieures à 6,5. Plus spécifiquement, dans la zone de culture du blé tendre (échantillons 1, 2 et 3), les valeurs de pH sont plus élevées que dans les quatre autres zones de culture, atteignant un pH supérieur à 7,5.

IV.1.1.2. Variation de la salinité travers conductivité électrique de sol dans la ferme pilote (BK)

La salinité du sol exprime la teneur en sels solubles présents dans le sol. La conductivité électrique (CE) est un indicateur essentiel pour surveiller la concentration de ces nutriments (**Hanna Instruments France**). En effet, la plupart des paramètres physico-chimiques sont influencés par la CE. Les mesures de la CE du sol de la parcelle de la ferme pilote BK ont produit les résultats présentés (**fig31**).

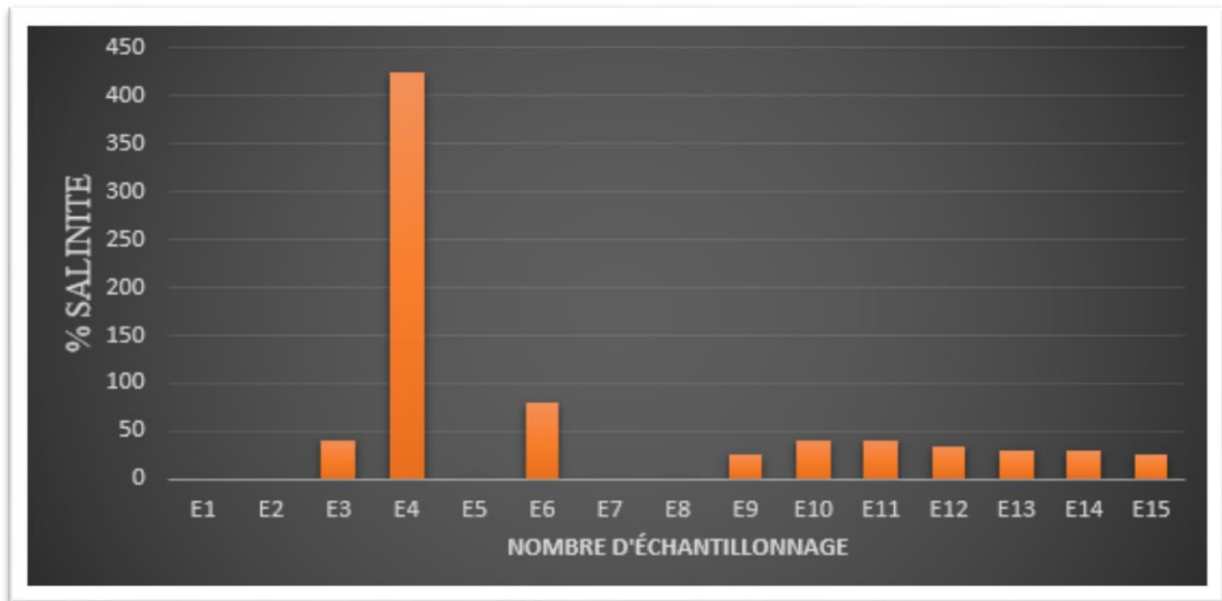


Figure 31: Histogramme de la variation de salinité des 15 échantillons mesurés (**photo originale**).

Selon l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, on observe que la conductivité électrique (CE) varie légèrement parmi les 15 échantillons. Elle oscille entre 23,45 % (échantillon 8) et atteint un maximum enregistré de 424 % à l'échantillon 4, avec une moyenne de 78,38 %. Il est important de noter que ces valeurs de CE correspondent à des sols non salés.

Dans l'ensemble, la couche superficielle de toutes les cinq cultures présente une CE supérieure à 0,6 dS/m ou 60000 μ S/m (voir Annexe 2), ce qui indique qu'elle n'est pas salée.

En résumé, d'après les données de l'histogramme, la conductivité électrique du sol semble présenter des variations légères entre les échantillons, mais dans l'ensemble, elle reste dans la plage de valeurs indiquant un sol non salé. Cette information est essentielle pour évaluer la qualité du sol et son aptitude à la culture des plantes dans la parcelle de la ferme pilote BK. Les niveaux de CE supérieurs à 0,6 dS/m ou 60000 μ S/m dans la couche superficielle de toutes les cultures renforcent la conclusion que le sol est globalement non salé, ce qui est favorable pour la réussite des cultures.

IV.1.1.3. Variation de matière organique de sol dans la ferme pilote (BK)

La matière organique (MO) du sol est essentielle pour fournir de l'énergie aux micro-organismes et pour améliorer et corriger la structure et la stabilité du sol (**Ministère de l'Agriculture, 2012**). En effet, elle joue un rôle majeur dans le fonctionnement global du sol. Les mesures de la MO du sol de la parcelle de la ferme pilote BK ont abouti aux résultats présentés (**fig.32**).

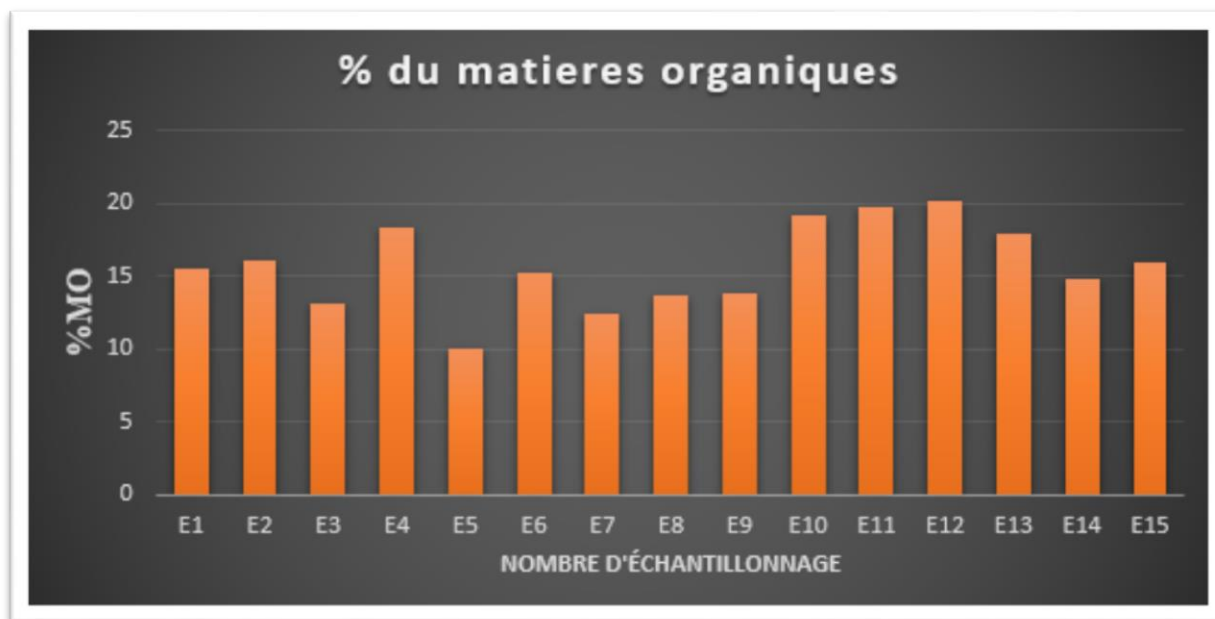


Figure 32: Histogramme de la variation de MO des 15 échantillons mesure (**photo originale**).

L'analyse de l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus met en évidence des variations légères de la matière organique (MO) parmi les 15 échantillons prélevés, avec des valeurs s'échelonnant de 10.1% (échantillon 5) à 20.2%, ce dernier étant le maximum enregistré à l'échantillon 12. La moyenne calculée de la MO est de 15.75%. Ces valeurs de MO sont considérées élevées, conformément à la classification de la Matière organique (Annexe 3).

De manière générale, il est notable que le sol des différentes superficies de culture (pomme de terre, orge, triticales, blé dur, blé tendre) de la ferme pilote BK présente des taux élevés de MO. Les pourcentages les plus élevés de MO ont été observés dans la parcelle 5 où la culture de pomme de terre est pratiquée.

IV.1.1.4. Variation de l'humidité de sol dans la ferme pilote (BK)

L'humidité du sol revêt une grande importance en favorisant le transport des matériaux à travers le profil du sol, tout en contribuant à améliorer la croissance des plantes du point de vue de la faune du sol (Globe, 2003). La mesure de l'humidité du sol de la parcelle de la ferme pilote BK nous a permis d'obtenir les résultats présentés (fig.33).

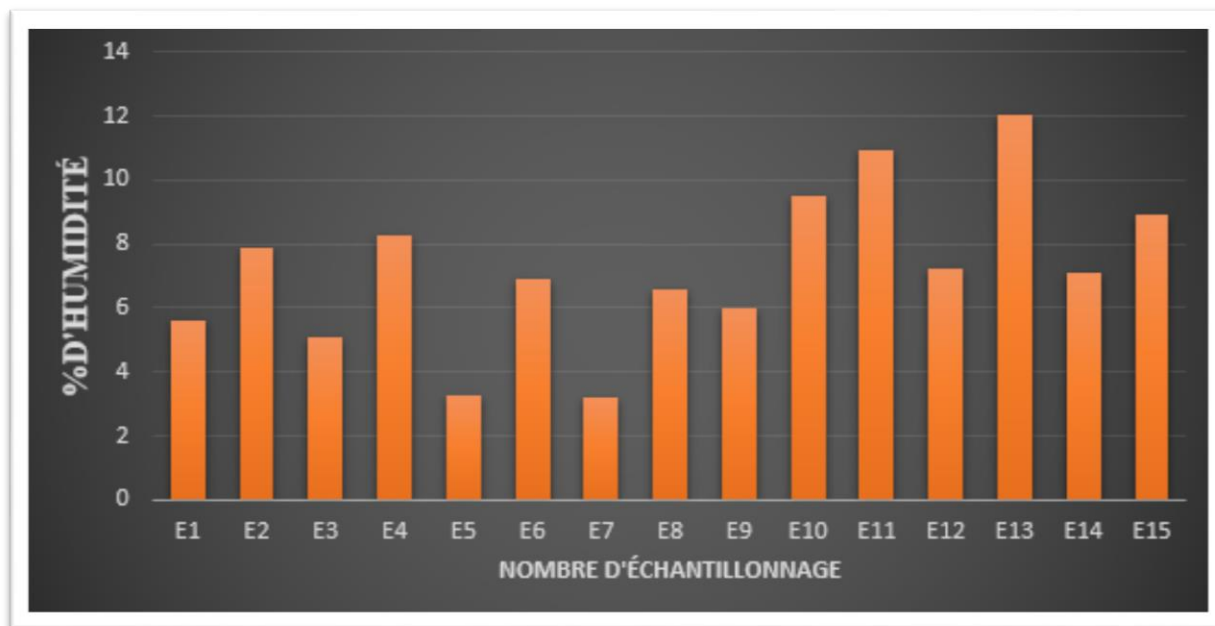


Figure 33: Histogramme de la variation d'humidité des 15 échantillons mesurés (photo originale).

D'après l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, il est observé que l'humidité du sol varie légèrement parmi les 15 échantillons, oscillant entre 3.2% (échantillon 7) et 12% qui est le maximum enregistré à l'échantillon 12, avec une moyenne de 7.23%. Ces valeurs indiquent un faible taux d'humidité (Annexe 4) selon la classification de l'humidité. Toutes les valeurs d'humidité des cinq cultures (moins de 35%) sont considérées comme sèches. Ceci peut être attribué au manque de précipitations antérieures à l'échantillonnage et à l'absence d'irrigation dans cette parcelle. Ces facteurs ont une influence sur le niveau d'humidité du sol.

IV.1.1.5. Variation de phosphore de sol dans la ferme pilote (BK)

Le phosphore du sol est un élément majeur de la fertilité du sol. Il joue un rôle crucial dans la maturation rapide des fruits et dans le développement des racines. Les mesures de phosphore du sol effectuées dans la parcelle de la ferme pilote BK ont fourni les résultats présentés (fig.34).

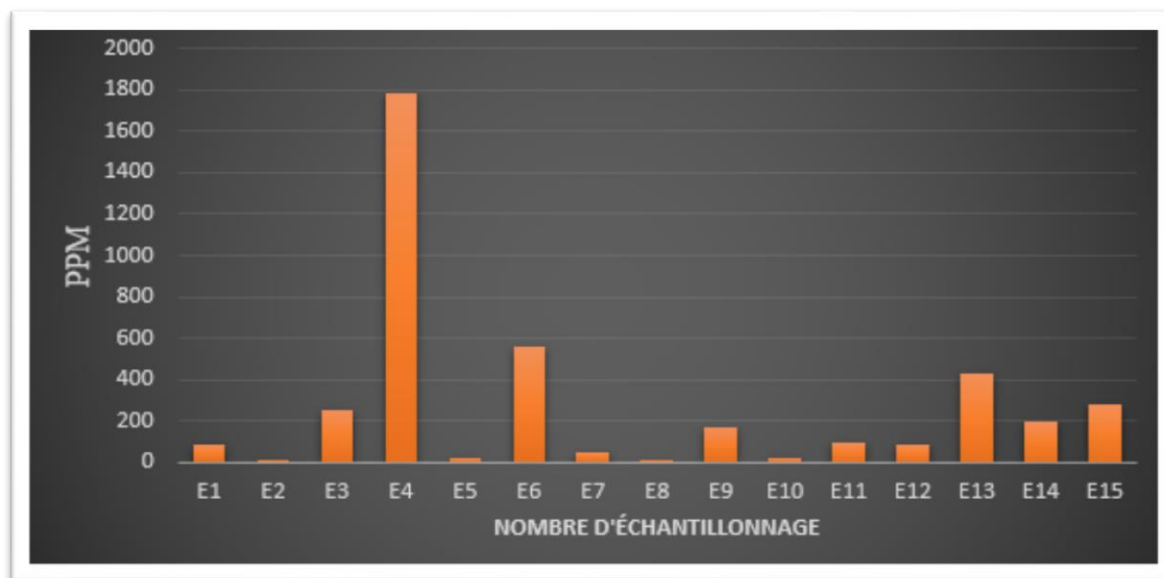


Figure 34: Histogramme de la variation du phosphore des 15 échantillons mesurés (photo originale).

D'après l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, on peut observer des variations légères dans les taux de phosphore des 15 échantillons. Les valeurs de phosphore varient entre 8 ppm (échantillon 8) et 1780 ppm, avec une moyenne de 271.53 ppm. Ces valeurs témoignent de niveaux élevés de phosphore dans plusieurs échantillons (Annexe 5). En analysant les différentes cultures, nous constatons les variations suivantes pour le phosphore :

- La culture de pomme de terre présente un niveau élevé de P.
- La culture de blé tendre affiche un niveau élevé de P.
- La culture de triticale montre un niveau moyen de P.
- La culture d'orge présente un niveau élevé de P.

Ces variations mettent en évidence la présence notable de phosphore dans les différentes cultures, avec des niveaux élevés particulièrement marqués dans les cultures de pomme de terre et d'orge.

IV.1.1.6. Variation de cuivre du sol dans la ferme pilote (BK)

Le cuivre est un élément oligo-élément complémentaire essentiel à la fertilité du sol. Il joue un rôle crucial dans la respiration cellulaire des plantes ainsi que dans l'absorption de l'azote par le processus d'humification. L'analyse du cuivre dans le sol de la parcelle de la ferme pilote BK a permis d'obtenir les résultats présentés (fig.35).

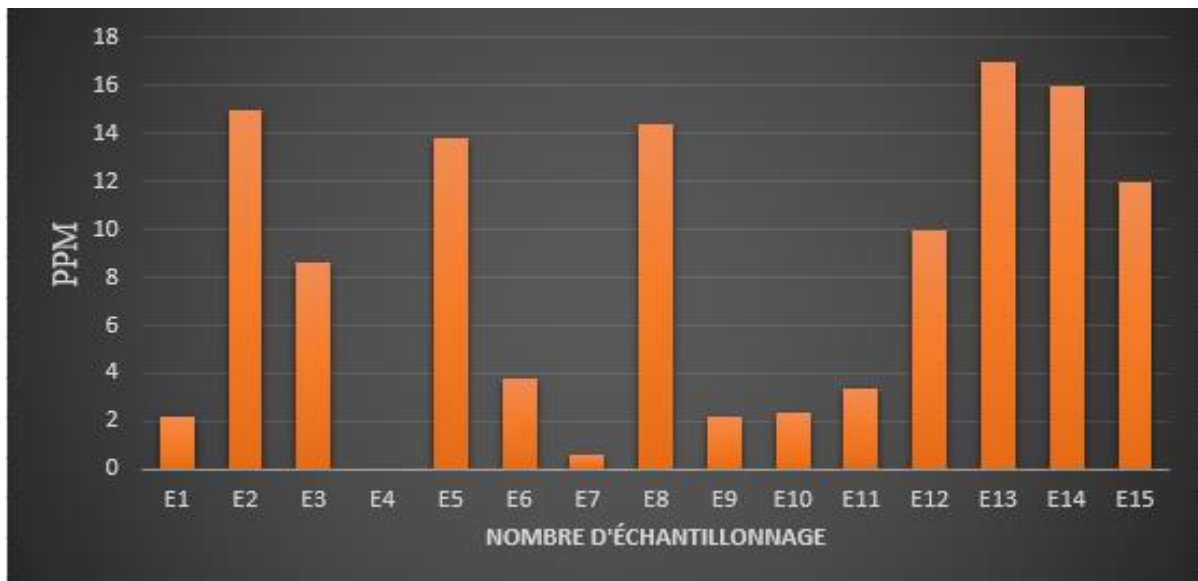


Figure 35: Histogramme de la variation du cuivre des 15 échantillons mesure (photo originale).

L'analyse de la figure ci-dessus révèle des variations légères dans les niveaux de cuivre parmi les 15 échantillons, avec une amplitude allant de 0 ppm (échantillon 4) à 17 ppm, le maximum étant enregistré à l'échantillon 13. La moyenne de la teneur en cuivre s'établit à 8.426 ppm. Il est notable que dans la culture de l'orge, la quantité de cuivre est supérieure par rapport aux autres cultures.

IV.1.1.7. Variation d'Azote ammoniacale du sol dans la ferme pilote (BK)

L'azote ammoniacal présent dans le sol est un élément secondaire qui complète la fertilité du sol. Il revêt une importance capitale pour les plantes, étant nécessaire à la fois pour la respiration cellulaire et pour l'absorption de l'azote. Les résultats de la mesure du cuivre dans le sol de la parcelle de la ferme pilote BK nous ont permis d'obtenir les données présentées (fig. 36).

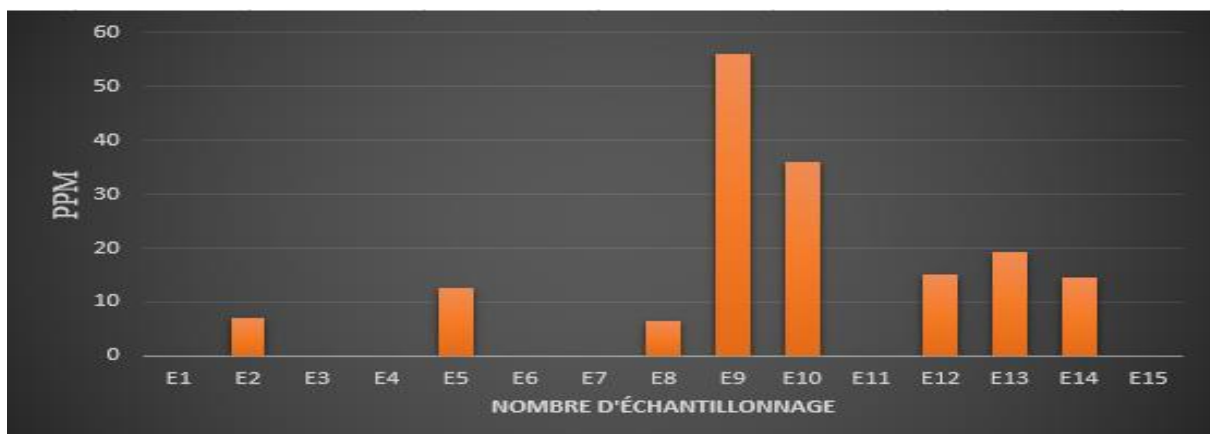


Figure 36: Histogramme de variation NH₃- des 15 échantillons mesure (photo originale).

Selon les données de l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, nous avons observé que les niveaux de phosphore présentent des variations légères parmi les 15 échantillons. Ils fluctuent entre 7 ppm (échantillon 2) et 56 ppm, qui représente la valeur maximale enregistrée à l'échantillon 9. La moyenne des valeurs de phosphore est de 20,85 ppm. Les échantillons sans valeur indiquent des concentrations inférieures. De plus, trois échantillons n'ont pas subi le test en raison d'un manque d'extrait.

En ce qui concerne la culture de l'orge, la teneur en cuivre est plus élevée par rapport aux autres cultures.

IV.1.1.8. Variation du dosage du calcaire total du sol dans la ferme pilote (BK)

Le calcaire total présent dans le sol se forme naturellement dans les régions à climat semi-aride ou aride. Il joue un rôle crucial dans les propriétés du sol (Rahmouni A, 2020). Les mesures du calcaire dans le sol de la parcelle de la ferme pilote BK ont permis d'obtenir les résultats présentés(fig.37).

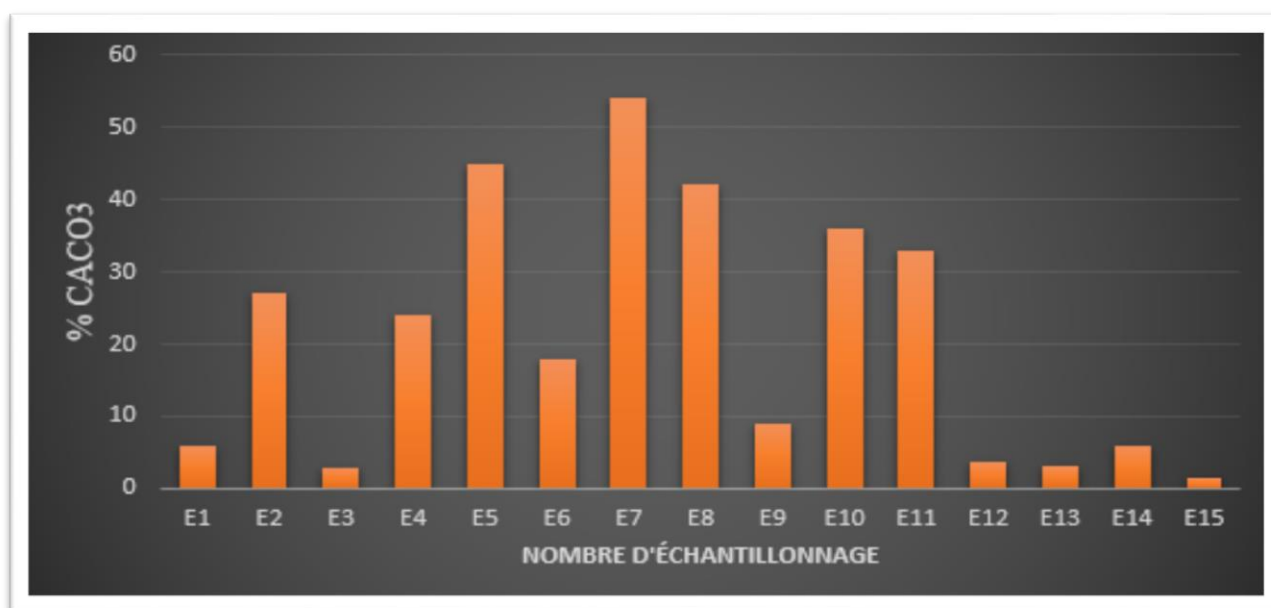


Figure 37: Histogramme de la variation du calcaire total des 15 échantillons mesurés (photo originale).

Selon les données de l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, des variations légères de calcaire ont été observées parmi les 15 échantillons. Les concentrations oscillent entre 1,5 % (échantillon 15) et 54 % la valeur maximale ayant été enregistrée à l'échantillon 7.

La moyenne des teneurs en calcaire est de 20,76 %. Les niveaux de calcaire varient d'une culture à l'autre (Annexe 6), montrant des différences significatives.

Dans le cas de la culture du blé tendre, le sol présente une teneur modérée en calcaire. Pour la deuxième culture (blé dur), la teneur en calcaire du sol reste modérément élevée. Pour la troisième culture (blé tendre), le sol affiche une forte teneur en calcaire. Pour la quatrième culture (pomme de terre), la teneur en calcaire du sol est également élevée. Enfin, pour la dernière culture (orge), la teneur en calcaire du sol est plus faible.

IV.1.1.9. Variation la perméabilité du sol dans la ferme pilote (BK)

La perméabilité du sol réfère à la capacité d'infiltration de l'eau à travers un échantillon donné. La présence d'une perméabilité significative joue un rôle crucial pendant les phases de tassement du sol (Berrabah, 2015). Les mesures de la perméabilité du sol de la parcelle de la ferme pilote BK ont été utilisées pour obtenir les résultats présentés (fig.38).

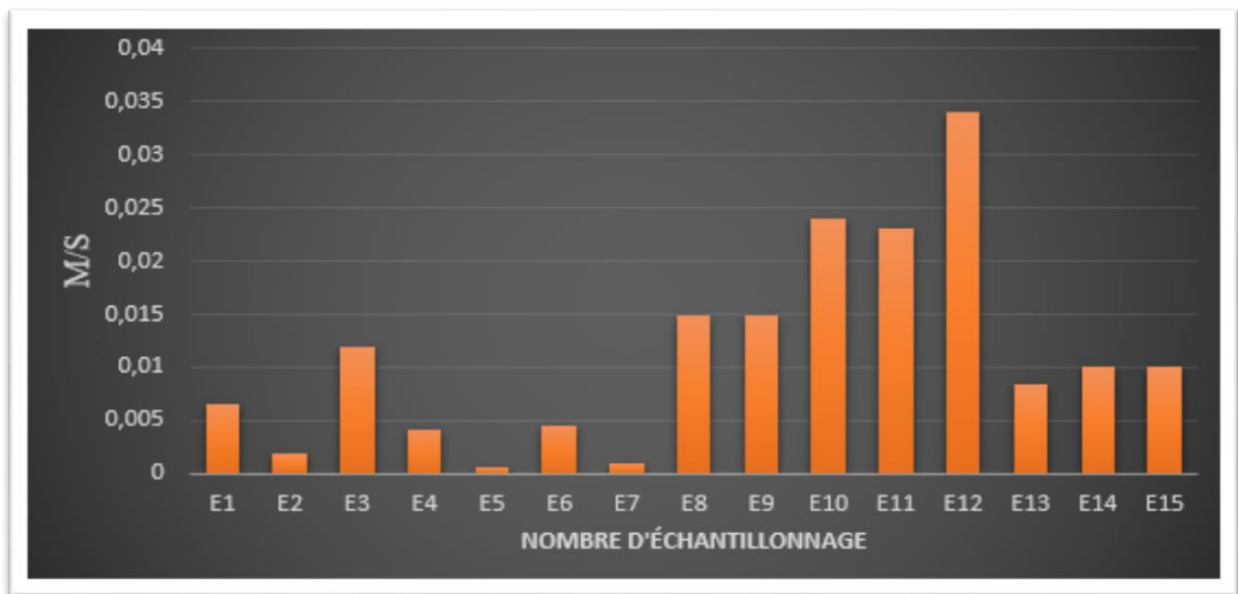


Figure 38: Histogramme de la variation de la perméabilité des 15 échantillons mesurés (photo originale).

Selon l'histogramme exposé dans la figure ci-dessus, il est observable que la perméabilité présente des variations légères parmi les 15 échantillons. Celle-ci fluctue entre 0,00061 m/s (échantillon 5) et 0,034 m/s, valeur maximale enregistrée à l'échantillon 12. La moyenne de la perméabilité se situe à 0,010 m/s, conformément aux données de teneur en calcaire (Annexe 7).

En ce qui concerne les cultures de blé tendre, de triticale et d'orge, le sol démontre une perméabilité très élevée, tandis que pour la culture de pommes de terre, le sol est également

perméable. En résumé, le sol de cette parcelle présente une perméabilité considérablement élevée.

IV.1.1.10. Variation du fer du sol dans la ferme pilote (BK)

Le fer est considéré comme un oligo-élément présent dans le sol, mais il demeure indisponible pour la vie des plantes. Néanmoins, sa signification physiologique demeure considérable (Heller in Acad. AGR, 1990). Il occupe une place active au sein des enzymes et des micro-organismes, et joue un rôle crucial dans le processus d'humification. Les résultats de la mesure de la teneur en fer dans le sol de la parcelle de la ferme pilote BK sont illustrés (fig.39).

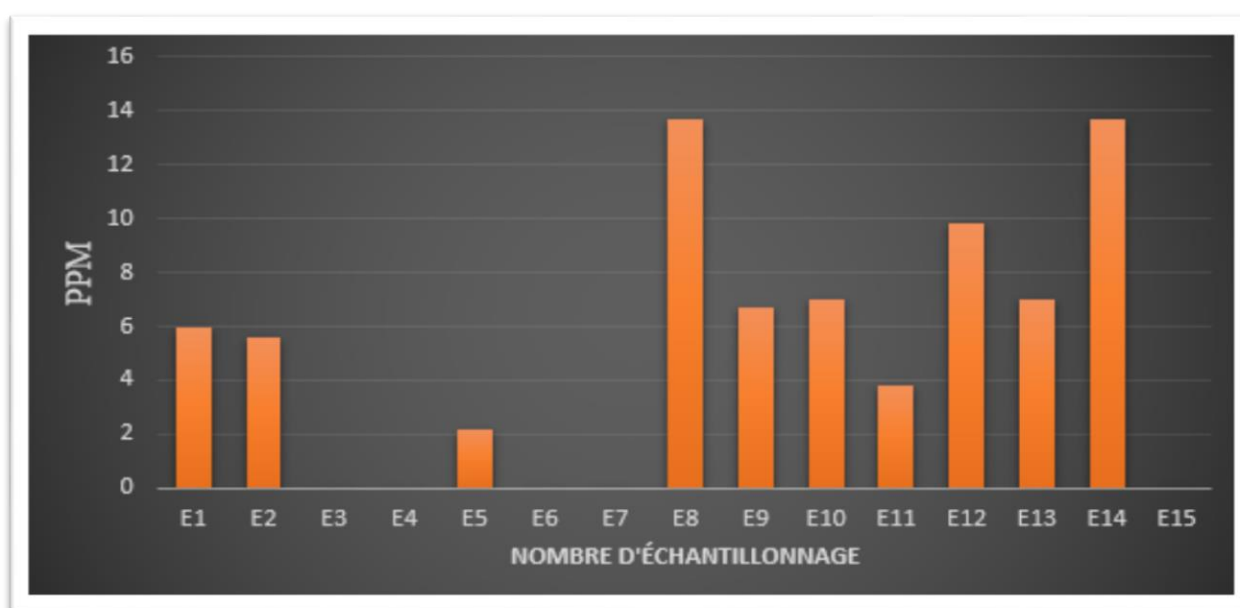


Figure 39: Histogramme de la variation de fer des 15 échantillons mesurés (photo originale).

Selon l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, il est observé que la concentration de fer présente des variations légères parmi les 15 échantillons. Celle-ci fluctue entre 2,2 ppm (échantillon 5) et atteint un maximum enregistré de 13,7 ppm aux (échantillons 14 et 8). La moyenne de la concentration en fer s'établit à 7,55 ppm, conformément aux valeurs de cuivre. Les échantillons qui ne possèdent pas de valeur sont ceux pour lesquels le test n'a pas été effectué en raison d'un manque d'extrait disponible.

IV.1.1.11. Variation d'aluminium du sol dans la ferme pilote (BK)

L'aluminium représente l'un des éléments fondamentaux du sol. Il est capable d'adopter des propriétés ioniques courantes dès lors que les caractéristiques habituelles des ions sont

éliminées (Segalen P, 1973). Les résultats de la mesure de la teneur en aluminium dans le sol de la parcelle de la ferme pilote BK sont présentés (figure 40).

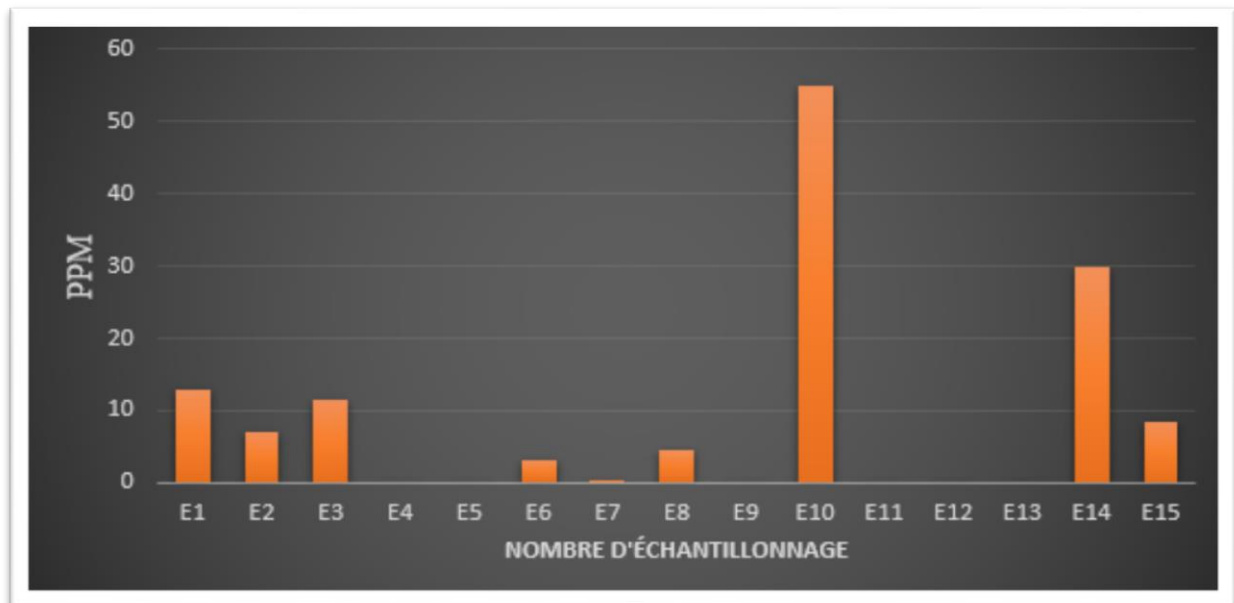


Figure 40: Histogramme de la variation d'aluminium des 15 échantillons mesurés (photo original).

Selon l'histogramme présenté dans la figure ci-dessus, il est observé que la concentration en aluminium présente des variations légères parmi les 15 échantillons. Celle-ci varie entre 0,4 ppm (échantillon 6) et atteint un maximum enregistré de 56 ppm à (l'échantillon 10), avec une moyenne de 14,3 ppm. Les échantillons sans valeur correspondent à des échantillons présentant des concentrations inférieures.

IV.1.1.12. Variation texture du sol dans la ferme pilote (BK)

La texture du sol, en relation avec la présence de sable, de limon et d'argile, revêt une importance cruciale pour la compréhension du sol. Il est essentiel de connaître cette texture, car elle influe sur la facilité de manipulation du sol dans la parcelle de la ferme pilote BK. Les résultats de cette caractéristique sont répertoriés dans (tableau 4).

Tableau 5: La texture des 15 échantillonne dans la ferme BK (**originelle**).

	La texture du sol
E1	Argileux limoneux
E2	Argileux limoneux
E3	Argileux sableux
E4	Argileux limoneux
E5	Argileux sableux
E6	Limoneux argileux
E7	Limoneux sableux
E8	Sableux limoneux
E9	Limoneux sableux
E10	Limoneux sableux
E11	Limoneux sableux
E12	Argileux limoneux
E13	Argileux sableux
E14	Limoneux sableux
E15	Argileux sableux

Dans le tableau ci-dessus, la texture du sol varie d'un échantillon à l'autre, et pour chaque culture, la texture dominante a été choisie.

Dans la première culture (blé tendre), le sol présente une texture argileuse limoneuse. Pour la deuxième culture (blé dur), la texture est également argileuse limoneuse. Dans la troisième culture (triticale), le sol présente une texture limono-sableuse, tandis que dans la quatrième culture (pomme de terre), la texture est limono-sableuse. Enfin, pour la culture d'orge, la texture prédominante est argileuse-sableuse.

IV.1.1.13. Variation la couleur du sol dans la ferme pilote (BK)

La couleur du sol constitue le premier paramètre observé par le pédologue sur le terrain. Elle joue un rôle crucial dans la délimitation des parcelles. Les mesures de la couleur du sol dans la parcelle de la ferme pilote BK ont donné lieu aux résultats présentés dans (**tableau 5**).

Tableau 6: La couleur des 15 échantillons dans la ferme BK (**originel**).

N° E	La couleur	La couleur
E1		10YR 4/3
E2		10YR 6/3
E3		10YR 5/3
E4		10YR 4/3
E5		10YR 5/4
E6		10YR 3/3
E7		10YR 5/4
E8		7,5YR 4/4
E9		10YR 5/3
E10		10YR 3/2
E11		10YR 4/3
E12		10YR 3 /4
E13		10YR 5/3
E14		10YR 4/3
E15		10YR 4/3

La couleur du sol des cultures telles que le blé tendre, le blé dur, le triticale, la pomme de terre ainsi que l'orge appartient au groupe 10YR, à l'exception de l'échantillon 8 qui appartient au groupe 7.5YR.

Conclusion générale

Conclusion générale

À l'issue de ce travail, dont l'objectif était de démontrer le potentiel et l'utilité des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans la quantification de 13 paramètres liés à la qualité du sol de la Ferme pilote située dans la wilaya de Bouira (Khabouzia), il est clair que les SIG jouent un rôle essentiel dans l'analyse et la gestion des données relatives au sol. Cette approche permet une meilleure compréhension des caractéristiques du sol, favorisant ainsi une prise de décision éclairée pour l'optimisation de l'agriculture et de la gestion des ressources naturelles dans cette région.

Le premier objectif de cette étude était d'évaluer la qualité du sol de la Ferme pilote Khabouzia BK en réalisant des mesures in-situ, suivies d'analyses en laboratoire portant sur les paramètres physico-chimiques de 15 échantillons de sol.

Au cours de l'étude sur le terrain, nous avons uniquement déterminé la localisation géographique des 15 échantillons, à savoir l'altitude et la longitude.

Les travaux de laboratoire ont été effectués à la Faculté SNV-ST pour les analyses physiques du sol, tandis que les analyses chimiques ont été réalisées à l'unité ASFERTRADE. Nous avons évalué divers paramètres, notamment le pH, la conductivité électrique, la perméabilité, la couleur, la texture, la matière organique, l'humidité, ainsi que les cinq éléments du sol (P, Cu, Fe, Al, NH₃-) et la teneur totale en calcaire.

À la suite des analyses effectuées sur les 15 échantillons, nous avons constaté que les paramètres varient d'un échantillon à l'autre. En général, nous pouvons estimer un équilibre global sur l'ensemble des échantillons, avec un pH du sol situé dans une plage neutre (entre 6,5 et 7,5).

La conductivité électrique (CE) dans l'ensemble des échantillons indique que le sol n'est pas salé ($CE > 60000 \mu S/m$). De plus, l'humidité est relativement faible ($H < 35\%$). La teneur en matière organique (MO) de tous les échantillons est supérieure à 4%, et la perméabilité dans cette parcelle de 15 échantillons est très élevée ($K < 0,01$).

La couleur du sol est du groupe 10YR, et la texture la plus fréquemment rencontrée est argileuse limoneuse. En ce qui concerne les éléments (P, Cu, Fe, Al, NH₃-), il n'est pas possible de fournir une valeur générale pour l'ensemble de la parcelle.

Le deuxième objectif de cette étude consistait à générer des cartes thématiques des paramètres physico-chimiques mesurés, afin de permettre une interprétation de leurs

variations géospatiales en utilisant un Système d'Information Géographique (SIG), en l'occurrence ArcGIS 10.7.1. Les cartes thématiques produites ont permis de mettre en évidence les variations géographiques des paramètres mesurés.

En conclusion, le suivi et la quantification des paramètres physico-chimiques revêtent une importance stratégique, économique et écologique cruciale pour les décideurs. La combinaison continue entre l'analyse des données satellitaires et les mesures in-situ renforcera notre objectif à long terme, visant à comprendre au mieux les facteurs impliqués dans la quantification des paramètres physico-chimiques du sol. Cette approche géomatique permettra d'établir des prévisions fiables et précises, ainsi que d'évaluer leur impact sur la qualité du sol dans les exploitations agricoles.

Annexes

Annexe 1 : la norme d'interprétation du pH (laboratoire ASFERTRADE, 2023)

pH	3,5-5	tres acide
pH	5-6,5	acide
pH	6,5-7,5	neutre
pH	7,5-8,7	Basique
pH	>8,7	très basique

Annexe 2 : la norme d'interprétation de la CE (laboratoire ASFERTRADE, 2023)

CE	CE de l'extrait de pate saturée	<2ds/m non salé 2-4 ds/m peu salé 4-8 ds/m salé 8-16 ds/m très salé >16 excessivement salé
CE	CE de l'extrait diluée 1/5	<0.6 non salé 0.6-1.4 peu salé 1.4-2.4 salé 2.4-6 très salé
CE	CE de l'extrait diluée 1/10	<0.25 non salé 0.25-0.5 peu salé 0.5-1 salé 1-2 très sales

Annexe 3 : la norme d'interprétation de la matière organique MO (Euskal Herriko, 2020)

MO<1.4%	Sol très pauvre en MO
1.4%<MO <2%	Sol pauvre en MO
2%< MO <3%	Sol le taux d'argile est <22%, le sol bien pourvu en MO
	Sol le taux d'argile est >30%, le sol pourvu en MO
MO>4%	Sol bien pourvu en MO

Annexe 4 : la norme d'interprétation d'humidité (Québec, 2016).

L'humidité	<35%	Sec
L'humidité	35%-60%	moyenne
L'humidité	>60%	humide

Annexe 5 : la norme d'interprétation phosphore P (laboratoire ASFERTRADE, 2023)

P	11.45%	Tres faible teneur
P	11.45%-22.9%	Teneur faible
P	>22.9%	Teneur élevé

Annexe 6 : la norme d'interprétation calcaire totale (Rahmouni A ,2020)

Calcaire totale	1%	Non calcaire
Calcaire totale	1%-5%	Peu calcaire
Calcaire totale	5%-25%	Modérément calcaire
Calcaire totale	25%-50%	Fortement calcaire
Calcaire totale	50%-80%	Très fortement calcaire
Calcaire totale	>80%	Excessivement calcaire

Annexe 7 : la norme d'interprétation du classée la perméabilité (Delly Karl A.H, 2006)

Vitesse d'infiltration K en cm/s	Types de sol
$K < 0.00001$	Sol imperméable
$0.00001 < K < 0.0001$	Sol peu perméable
$0.0001 < K < 0.001$	Sol moyennement perméable
$0.001 < K < 0.01$	Sol perméable
$K < 0.01$	Sol très perméable

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- ARAGNO M, GOBAT. JM. MATTHEY W. 2003. Le sol vivant, base pédologie/Biologie des sols. 2ed, imprimé en France, 568 p
- ARCGIS DESKTOP (10), 2006
- Athan T. (2010). Quantum GIS, Manuel Utilisation, Version 1,3. 'Mimas' Quantum GIS Development Team. 10p.
- AUBERT G.1950.les sols des régions semi- arides d'affrique el leur mise en valeur- in encyclopédie colonial vol .A.O.F
- Baize D. Et Jabiol B., Guide Pour La Description Des Sols, Collection Techniques Et Pratiques, INRA, Paris. 1995.
- Benachour Houcine : « Initiation au système d'information géographique »2011
- BOIFFIN (J.) et SEBILLOTTE (M.), 1982. - Fertilité, potentialité, aptitudes culturales. Signification actuelle pour l'agronomie. In Fertilité du Milieu et Agriculture, n° spécial Bull. Tech. Inf., n0370-372,345-363.
- BOIFFIN J et MARIN – LAFLECHE A.1990. La structure du sol et son évolution, Conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. Ed INRA, Paris, 215 p.
- Boivin P, Maeght J. L, Hammecker C, Barbiero L, FAVRE F, Wopereis M, (1998). Evolution of irrigated soils in the Senegal River valley: alkaline or neutral Stalination process. 16eme congrès mondial de science du sol, symposium 29, poster 1260, vol. II, p541.
- Boulaine, J. Histoire Des Pédologues Et De La Science Du Sol. Ed. INRA. 285 P. 1989.
- Bouras, O. 2003, Propriétés adsorbantes d'argiles pontées organophiles : synthèse et caractérisation. Thèse de doctorat, Université de Limoges.
- Cabrera, A., Celis, R., Hermosin, M. C. 2015, Imazamox-clay complexes with chitosan and iron(III)-modified smectites and their use in nanoformulations, Pest Manag Sci, 72,1285–1294.
- Caillère, S., Hénin S., Rautureau, M. 1982, Minéralogie des argiles: II. Classification et nomenclature, Editions INRA et Masson, Paris, France.
- CALLOT G. 1981. Les interactions sol – racine, incidences sur la nutrition minérale. Ed.INRA, Paris, 305 p

- Calvet, R. Le Sol : Propriétés Et Fonctions. Tome 1 : Constitution Et Structure, Phénomènes Aux Interfaces. Ed. France Agricole. 456 P. 2003.
- Centre Canadien de Télédétection (CCT). (2008). Tutoriel : Notions Fondamentales de Télédétection.
- Centre D'expertise En Analyse Environnementale Du Québec, 2011. Détermination Du Phosphore Total Dans Les Effluents : Digestion A L'autoclave Avec Persulfate, Méthode
- CHATNET Michèle, Mazarin Candy, Girard Jean-Claude, Fernandez Emmanuel, Gargani Daniel, Rao Govind P., Royer Monique, .Rott Philippe. 2005. Detection of Sugarcane streak mosaic virus in sugarcane from several asian countries. In: International Society of Sugar Cane Technologists Proceedings of the XXV Congress, 30 January - 4 February 2005, Guatemala. Ed. Hogarth. .Guatemala: ATAGUA, 656-663. ISBN 99922-2-211-5 ISSCT Congress. 25, Guatemala, Guatemala, 30 Janvier 2005/4 Février 2005.
- Cherbuy B, (1991). Les sols et leurs réhabilitations : Etude bibliographique. E.N.S.A Renne, 124p.
- Clément Mathieu, Les principaux sols du monde, Lavoisier, 2009, p. 12
- Colorimétrie Automatisée, Ma. 315 – P 2.0, Ministère Du Développement Durable, De L'environnement Et Des Parcs, 11 P.
- Cours de bioclimatologie l'usage des forestiers Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, Paris.245 p.
- Cours de bioclimatologie l'usage des forestiers Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement, Paris.245 p.
- Decarreau, A. 1990, Matériaux argileux, structure, propriétés et applications, Edition Masson, Paris, France.
- DELOMON (A.), 1968. - Croissance des végétaux cultivés. Principes d'Agronomie TII, e édition Dunod, Paris.
- DEMOLON A. 1968. Croissance des végétaux cultivés, Ed DUNOD, 6eme édition, Tome II,paris, 520 p.
- Denis Baize et Bernard Jabiol, Guide pour la description des sols, Quae, 1995, p. 194
- Duchaufour, P. 1988, Abrégé de pédologie, Edition Masson, Paris, France.
- Duchaufour, P. Abrégés De Pédologie. Ed. Masson. Paris, 220 P. 1984.

- Ducrot D. (2005). Méthodes d'analyses d'interprétation d'images de télédétection multisources, Extraction de caractéristiques du paysage. Mémoire d'habitation à Diriger des Recherches. INP Toulouse. 240 p.
- Dyer, A., Gallardo, T. 1990, Cation and anion exchange properties of pillared clays. In: Recent Developments in Ion Exchange (P. A. Williams and M. J. Hudson, Eds). Elsevier Applied Science, London, 75-84.
- Dykstra D.P. (1996). Système d'information appliquée à la foresterie. Revue international des forêts et des industries forestières (FAO). Vol. 47, No. 189. (En ligne) (dernière visite, Aout 2010).
- El Titi A. 2003a. Soil tillage in agroecosystems. CRC Press, New-York (USA)
- ESRI . (2004). Utilisation d'Arc Map, Arc GIS 9, ESRI 380 New York Street Realands. ESRI France 21. 646p.
- Galatia S.R. (2006).Géographique information système demystified. Ed. Artech house,Boston. 118p.
- Glossary of Soil Science Terms. Ed. Soil Science Society Of America. Am. J. Potato Res. 42, 346. 1965. [Online] <https://www.soils.org/publications/soils-glossary>.
- GRIMALDI M., INGRAM J. et MONROZIER L.J. 1998. The interaction of soil biota and soil structure under global change. Global Change Biology, 4, 703-712
- HAMENNI, N. (2011) mémoire en vue de l'obtention du mémoire de magister en science agronomique. Étude des ressources en eau du bassin versant dela Soummam par l'utilisation de SIG, école national supérieure d'agronomie .153p
- HENIN S, GRAS R, MONNIER G. 1969. Le profil cultural, l'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Ed. Masson et Cie, Paris, 332p.
- Hermosin, M. C., Cornejo, J. 1989, Assessing factors related to pesticide adsorption by soils. Toxicol. Environ. Chem. 25, 45-55.
- Hillel, D. Introduction To Soil Physics. Ed. Academic Press. New York, USA, 364P. 1982.
- IAAT. (2003). Cahier méthodologique sur la mise en œuvre d'un SIG. Territoires numérique.10p.
- Ider, K. (2004). Modélisation hydrodynamique cour d'eau Application a l'Oued Soummam Mémoire ENP Alger 124 p
- JAMAGNE M, (1976). Bases et techniques d'une cartographie des sols, vol : 18, n° Horssérie. Ed. INRA. Paris, 142 p.

- Jayne, W. F., Boyd, S. A. 1991. Clay mineral type and organic compound sorption by hexadecyltrimethylammonium exchanged clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, 43-48.
- Jean Demangeot, Les milieux « naturels » du globe, Armand Colin, 2009, p. 87
- Kergomard. C.,2004. La télédétection aéro-spatial : une introduction, cours de l'Ecole Normale Supérieure Paris, 74p
- Kharchi, I., Medjeneh, D., Legouireh, A., (2022). Mémoire master. Système d'information géographique pour l'étude de la gestion des ressources en eau dans une région semi-aride (cas de la région de Bou Saada - M'Sila / Algérie). Université de M'Sila
- Khatem R. 2017, Etude des propriétés adsorbantes des argiles modifiées vis à vis de polluants organiques. Cas des pesticides et des produits pharmaceutiques. Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem
- Legros, J.P. Les Grands Sols Du Monde. Ed. Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes. Lausanne, 574 P. 2007.
- Livre Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2007). Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Marcel Dekker, New York, 463-566.
- Montoroi J.P, (2005). Sols et environnement : sols salés et environnements. Dunod, Paris, 816p
- Morel, R. 1989, Les sols cultivés, Edition Technique et documentation–Lavoisier, Paris
- Net 1 : <https://www.lenntech.fr/sulfates.htm#ixzz76xG89AOD>
- Nortcliff.S.(2002).Standardisation Of Soil Quality Attributs. *griculture.Ecosystems & Environment* 88(2)P161-168
- OADES J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure.*Geoderma*, 56, 377-400.
- OORTS K. 2006. Effect of tillage system on soil organic matter stocks and C and N fluxes in cereal cropping systems on a silt loam soil in Northern France, PhD thesis, Institut National Agronomique Paris-Grignon,Paris
- Ougrine M. (2003). Contribution des images ETM+ de Landsat 7 à la mise à jour cartographique à 1/200 000, cas de la feuille de M'silla (Hauts Plateaux Algérie). Centre régional Africain des sciences et technologies de l'espace en langue française. Pp 9-17.

- Pansu, M. And Gautheyrou, J., L'analyse Du Sol Minéralogique, Organique Et Minérale. Edition Springer. 2001. Clément Mathieu et Jean Lozet, Dictionnaire encyclopédique de science du sol, Lavoisier, 2011, p. 285
- Philippe Duchaufour, Précis de pédologie, Masson, 1960, p. 173
- Ruellan, A., Delétang, J. 1967, Les phénomènes d'échange de cations et d'anions dans les sols. Initiations - Documentations Techniques n° 5, ORSTOM, Paris.
- SEBILLOTTE (M.), 1982. - Les systèmes de culture. Réflexion sur l'intérêt et l'emploi de cette notion à partir de l'expérience acquise en région de grande culture. In séminaire du département d'Agronomie de l'INRA, Vichy, doc. multigr., 63-80
- Serrutun S. & Grossely C.P. (1997). Use of digital terrain modeling for farm planning for mechanical harvest of sugar cane in Mauritius. Computers and electronics in agriculture 18. Pp 29-52.
- Site1 : jmassenet-foret.fr/cours/pédologie/PEDO4-2012.pdf
- SOUTY N. 1987. Aspect mécanique de la croissance des racines, mesure de la force de pénétration, agronomie 7 (8) Montfavet, pp623-630
- Sposito, G., The Chemistry Of Soils. Oxford University Press, New York. 2008.
- Sposito. G. 1997. The Chemical Composition Of Soils. The Chemistry Of Soils. Oxford University Press. New-York: P3-27
- Tadjeddine B. (2001). Diagnostic écologique et proposition d'un modèle d'aménagement : cas des systèmes écologiques fragilisés de la région d'El Baidh (Algérie). Thèse, Mag. Centre Univ. Mascara. 116p).
- Tessier, D. 1984, Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux: Hydratation, gonflement et saturation au cours de la dessiccation et de la réhumectation, Edition Technique et documentation—Lavoisier, Paris.
- « Travaux Pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG), Initiation à ArcGIS, Antoine DENIS, 2012, Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique ». « Travaux Pratiques sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG), Initiation à ArcGIS, Antoine DENIS, 2012, Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique ».
- Yariv, S., Cross, H. 2001, Staining of clay minerals and visible absorption spectroscopy of dye-clay complexes, In: Organo-clay complexes and interactions. (S. Yariv, H. Cross., Eds).
- YOUNG I.M., BLANCHART E., CHENU C., DANGERFIELD M., FRAGOSO C.,

Résumé

Les sols cultivés se révèlent être vulnérables face à diverses pollutions, souvent engendrées par l'utilisation excessive d'engrais en grande quantité et le manque de suivi des besoins spécifiques du sol. Par conséquent, leur qualité est fréquemment médiocre. Ces sols sont susceptibles de contenir diverses substances, de nature physico-chimique. L'objectif de notre travail est de mettre en évidence le potentiel et l'utilité des Systèmes d'Information Géographique (SIG) dans la quantification de 13 paramètres liés à la qualité des sols de la Ferme pilote BK, située dans la wilaya de Bouira (Khabouzia).

Tout d'abord, nous avons évalué la qualité initiale du sol de la Ferme pilote Khabouzia (BK) en effectuant des mesures in-situ, suivies d'analyses en laboratoire portant sur les paramètres physico-chimiques de 15 échantillons de sol. Au sein du laboratoire de la Faculté SNV-ST et de l'unité Asfertrade, nous avons procédé à l'évaluation des paramètres suivants : pH, conductivité électrique, perméabilité, matière organique, humidité, calcaire total, texture, couleur et les cinq éléments du sol.

Deuxièmement, grâce à l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) tel qu'ArcGIS 10.7.1, nous avons généré des cartes thématiques des paramètres mesurés pour mettre en évidence leurs variations géographiques.

L'utilité du SIG a été examinée et démontrée par des analyses informatiques. La poursuite de la combinaison entre l'analyse des données satellitaires et les mesures in-situ renforcera notre objectif à long terme, qui vise à mieux comprendre l'ensemble des facteurs impliqués dans la quantification des paramètres physico-chimiques du sol. Cette approche géomatique nous permettra de développer des prévisions fiables et précises, tout en évaluant leur impact sur la qualité du sol de la ferme.

Mots clés : sol cultivée, paramètres physico-chimiques, cartographie et SIG

Abstract

Cultivated soils are vulnerable to various forms of pollution, often due to the excessive use of large quantities of fertilizers and the lack of monitoring of soil needs, leading to their frequently poor quality. These soils have the potential to contain various substances of a physico-chemical nature. Our objective is to demonstrate the potential and usefulness of GIS in quantifying (13) parameters related to the quality of soils at the BK pilot farm in the Bouira wilaya (Khabouzia).

Firstly, we determined the initial soil quality of the Khabouzia pilot farm (BK) by conducting in-situ measurements followed by laboratory analyses of the physico-chemical parameters of 15 soil samples. In the laboratory work conducted at the SNV-ST Faculty and the Asfertrade unit, we assessed parameters including pH, electrical conductivity, permeability, organic matter, moisture content, total limestone content, texture, color, and the five soil elements.

Secondly, by utilizing a Geographic Information System (GIS) such as ArcGIS 10.7.1, thematic maps of the measured parameters were generated to illustrate their geographical variations. The utility of GIS was investigated and substantiated through in-silico analyses. The ongoing combination of satellite data analysis with in-situ measurements should further reinforce our long-term objective of comprehensively understanding the multitude of factors involved in quantifying soil physico-chemical parameters and applying this geomatic approach to develop reliable and precise predictions, even assessing their impact on soil quality at the farm.

Keywords: cultivated soil, physico-chemical parameters, mapping and GIS.

ملخص

التربة المزروعة معرضة لمختلف أشكال التلوث، وغالبا ما يكون سببها الإفراط في استخدام الأسمدة بكميات كبيرة وعدم رصد احتياجات محددة من التربة. وبالتالي، غالبا ما تكون نوعيتها رديئة. من المحتمل أن تحتوي هذه التربة على مواد مختلفة ذات طبيعة فيزيائية كيميائية. الهدف من عملنا هو تسليط الضوء على إمكانيات وفائدة نظم المعلومات الجغرافية (SIG) في القياس الكمي لـ 13 بارامترًا تتعلق بنوعية التربة في مزرعة BK التجريبية، الواقعة في ولاية البويرة (خابوزيا). أولاً، قمنا بتقييم جودة التربة الأولية لمزرعة خابوزيا التجريبية (BK) من خلال إجراء قياسات في الموقع، تليها تحليلات معملية للبارامترات الفيزيائية والكيميائية لـ 15 عينة من التربة. في مختبر كلية SNV-ST ووحدة Asfertrade، قمنا بتقييم المعلمات التالية: pH، التوصيل الكهربائي، النفاذية، المادة العضوية، الرطوبة، الحجر الجيري الكلي، الملمس، اللون وعناصر التربة الخمسة. ثانياً، باستخدام نظام المعلومات الجغرافية (GIS) مثل ArcGIS 10.7.1، قمنا بإعداد خرائط مواضيعية للبارامترات المقاسة لتسليط الضوء على اختلافاتها الجغرافية. تم فحص فائدة نظام المعلومات الجغرافية وبيانه من خلال التحليل الحاسوبي. إن استمرار الجمع بين تحليل البيانات الساتلية والقياسات الموقعية سيعزز هدفنا على المدى الطويل، والذي يهدف إلى فهم أفضل لجميع العوامل التي ينطوي عليها القياس الكمي للبارامترات الفيزيائية والكيميائية للتربة. سيسمح لنا نهج الجيوماتيكا هذا بتطوير تنبؤات موثوقة ودقيقة، مع تقييم تأثيرها على جودة التربة في المزرعة..

الكلمات الرئيسية: التربة المزروعة، والبارامترات الفيزيائية - الكيميائية، ورسم الخرائط، ونظم المعلومات الجغرافية