

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE CHIMIE



DOMAINE : SCIENCES DE LA MATIERE
FILIÈRE : CHIMIE
SPÉCIALITÉ : CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

THÈME

**Contribution à la caractérisation physico-chimique et
biologique des engrais organo-minéraux**

Présenté par :

M^{me} BEN LAZIZ Malika

Mémoire soutenu publiquement, le 29/06/2025 devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Affiliation</i>	<i>Qualité</i>
M^r KADOUCHE Slimane	MCA	UMMTO	Président
M^r GRABI Hocine	MCB	USTHB	Examineur
M^{me} BOUTEBTOUB Wahiba	MCB	UMMTO	Examineur
M^{me} LOUNI Dalila	MAA	UMMTO	Encadrant
M^{me} MOUAS BOURBIA Sophia	Professeur	UMMTO	Co-encadrant
Dahmani M^{ed} Said	Doctorant	UMMTO	Invité

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu tout puissant de m'avoir aidé à réaliser ce discret travail.

Je remercie très chaleureusement mon encadreur **M^{me} LOUNI Dalila**, qui a ménagé effort pour que ce mémoire puisse voir le jour. Je lui exprime ma gratitude de m'avoir dirigé, encouragé et surtout aidé afin de réaliser ce travail.

Je témoigne ma profonde gratitude à ma Co-Promotrice, **M^{me} BOURBIA Sophia**, dont les conseils, la confiance et la patience constituent une contribution considérable sans laquelle ce travail n'aurait pas atteint le bon port. Puisse-t-elle trouver un grand respect pour son aide dans ce travail.

J'adresse également mes remerciements à **M^r KADOUCHE Slimane** qui m'a fait l'honneur de présider ce jury de thèse.

Je remercie vivement les membres de jury **M^rGRABI Hocine et M^{me} BOUTEBTOUB Wahiba** pour le privilège qu'ils nous font, de l'intérêt porté à notre thématique et d'avoir accepté d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs recommandations.

J'exprime aussi ma gratitude à **M^r DAHMANI M^{ed} Said**

Je tiens également à remercier chaleureusement l'ensemble du personnel du laboratoire de pédologie du département de biologie et agronomie ainsi que celui du laboratoire d'électrochimie de la faculté des sciences pour leur accueil, leur aide et leurs bonnes explications.

Enfin, un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation universitaire ainsi que les personnes qui m'ont apporté de l'aide de près ou de loin.

Dédicaces

Avant tout, je rends grâce à Dieu pour sa bienveillance et ses innombrables bienfaits.

À mon unique refuge d'enfance, celle dont l'amour et la tendresse m'ont toujours enveloppée, celle qui m'a soutenue dans les moments les plus durs, et qui reste la plus proche de mon cœur :

À ma chère mère, Saliha.

À celui qui m'a tracé le chemin de la réussite, qui n'a jamais ménagé ses efforts pour m'encourager, et dont les sacrifices ont rendu possible ce parcours :

À mon père, Mehana, avec toute ma reconnaissance.

À mes frères **Mouloud, Amokrane, Juba, Boussad, Amar, Hatem,**

à mes sœurs **Messad, Tounsia, Kahina** et **Sandrine,**
ainsi qu'à leurs enfants,

pour leur aide précieuse, leurs conseils et leur présence rassurante.

À mon époux **Yacine,** pour son amour constant, sa patience infinie et sa force douce qui m'ont portée dans les moments de doute.

À mes beaux-parents, **Hamid** et **Malika,**
à mes belles-sœurs **Hayat, Lila, Aïni, Dyna** et **Nacera,**
à mes beaux-frères **Mhend, Mustapha, Hakim, Azouaou** et
Nourredine,

ainsi qu'à leurs enfants, pour leur générosité, leur bienveillance et leur soutien indéfectible.

À mes amies **Yasmine, Christel, Assia, Hadil, Fahima, Nessrine** et **Lysa,** pour leur précieuse amitié et leur présence à mes côtés.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à cette aventure, je vous adresse ma plus profonde gratitude.

Malika

Index des abréviations

Index des figures

Index des tableaux

Résumé

Introduction 1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. Généralités sur le matériau bois 3

I.1. Composition élémentaire du bois 3

I.2. Composition chimique du bois..... 4

I.3. Transformation d'un matériel végétal en charbon actif.....4

I.3.1. Processus de carbonisation de la matière végétale.....5

I.3.1.1. Pyrolyse ou carbonisation5

I.4. Structure et nature chimique de la surface des charbons actifs6

II. Propriétés physiques et chimiques des biochars 6

II.1. Propriétés physiques 7

II.1.1. Surface spécifique 7

II.1.2. Porosité 7

II.1.3. Densité apparente..... 7

II.1.4. Capacité d'échange cationique (CEC)..... 7

II.1.5. Contenu en cendres 7

II.2. Propriétés chimiques 8

II.2.1. Composition chimique du carbone 8

II.2.2. pH..... 8

II.2.3. Présence de contaminants 8

II.2.4. Propriétés adsorbantes 8

II.2.5. Stabilité chimique 9

III. Structure chimique et groupes fonctionnels du biochar	9
III.1. Groupes fonctionnels à la surface du biochar	9
IV. Mécanismes d'adsorption des polluants par le biochar	10
IV.1. Adsorption physique et chimique	10
IV.2. Échange d'ions	10
IV.3. Complexation.....	11
IV.4. Précipitation	11
V. Modifications du biochar pour améliorer son efficacité	11
VI. Applications environnementales du biochar.....	12
VII. Engrais	12
VII.1. Engrais organique	12
VII.2. Engrais minéral	12
VII.3. Engrais organo- minéral.....	13
VIII. Propriétés physico-chimiques des engrais	13
IX. Autres caractéristiques.....	13
IX.1. Présence de biochar.....	13
IX.2. Teneur en cendres	13
X. Propriétés biologiques (germination, phytotoxicité)	14
XI. Les enjeux environnementaux liés aux engrais chimiques	14
XII. La législation des engrais en Algérie	14
Chapitre II : Matériels et méthodes	
II.1. Introduction.....	13
II.2. Caractéristiques physico-chimique et biologique des engrais	13
II.2.1. Caractéristique physique des engrais	13
II.2.1.1. Mesure du taux d'humidité	13

II.2.1.2. Mesure de la conductivité électrique	14
II.2.1.3. Mesure du pH.....	15
II.2.1.4. Dosage de carbone organique (Méthode d'Ann modifiée).....	16
II.2.2. Caractéristique Chimique des engrais.....	18
II.2.2.1. Dosage de carbone organique (Méthode perte au feu)	18
II.3. Mesure du Spectroscopie infrarouge (FTIR)	19
II.4. Test de phyto-toxicité des engrais	20
 Chapitre III : Résultats et discussions	
III.A. Caractérisation physico-chimique des engrais.....	23
III.1. Caractérisation physique des engrais organo-minéraux	23
1-Taux d'humidité	23
III.2. Caractérisation chimique des engrais organo-minéraux.....	24
III.2.1. Conductivité électrique	24
III.2.2. pH	25
III.2.3. Teneur en matière organique des engrais par la méthode d'Ann modifiée	25
III.2.4. Teneurs en matière organique par perte au feu	26
III.2.5. Comparaison entre la méthode d'Ann modifié et celle de la perte au feu.....	27
III.3. Analyse des échantillons par spectrophotométrie Infrarouge.....	28
III.4. Test de phytotoxicité des engrais	33
A. Pourcentage de germination des graines de cresson	33
B. Indice de germination des graines de cresson	34
C. Longueur moyenne de racines des plantules de cresson	36
Conclusion	38
Bibliographie	
Annexes	

GES : gaz à effets de serre

Etc. : etcetera

°C : degré Celsius

Min : minute

nm : nanomètre

pH : potentiel d'hydrogène

TH : taux d'humidité

g : gramme

mL : millilitre

cm : centimètre

h : heure

min : minute

N : normal

NAF : fluorure de sodium

MS : matière sèche

MO : matière organique

CEC/CE : conductivité électrique

M : masse

C : concentration

MOR : matières organiques résiduelles

μS : micro-siemens

FAO : Food and Agriculture Organization

CEN : Comité européen de normalisation

AFNOR : Association Française de Normalisation

IR : spectrophotométrie Infrarouge

IR : infrarouge

IG : indice de germination

MAP : Mono ammonium phosphate

NPK : engrais solide complet, signifiant qu'il contient de l'azote (N), du phosphore (P) et du potassium (K) dans des proportions égales de 15 %

CCQCPA : Centre de Contrôle de la Qualité et de Conditionnement des Produits Agricoles

Figure 1 : Structure macroscopique d'un arbre - détails des différentes parties du tronc (Original, 2025).

Figure 2 : Quelques photos des biochars (Original, 2025).

Figure 3 : Schéma simplifié du principe d'adsorption en phase liquide sur une particule de charbon actif (Original, 2025).

Figure 4 : Structure chimique du biochar et groupes fonctionnels à sa surface (Original, 2025).

Figures 05 : préparation des douze échantillons utilisés (Original, 2025).

Figure 06 : Mesure de la conductivité électrique après dissolution des échantillons (Original, 2025).

Figure 07 : Agitation magnétique et mesure du pH de chaque échantillon respectivement (Original, 2025).

Figure 08 : Passage du brun violacé au bleu vert après dosage de la solution par sel de Mohr(Original, 2025).

Figure 09 : pesé et mise à dessiccateur des échantillons respectivement (Original, 2025).

Figures 10 : Spectrophotomètre Infrarouge ; Spectrophotomètre IRAffinity-1S (Original, 2025).

Figure 11 : Illustration de quelques étapes de test de phytotoxicité des engrais (Original, 2025).

Figure 12 : Taux d'humidité des 12 engrais (Original, 2025).

Figure13 : Valeurs de la conductivité électrique des engrais organo- minéraux à 21°C (Original, 2025).

Figure14 : Valeurs du pH des engrais organo- minéraux (Original, 2025).

Figure 15 : Teneurs en matière organique des engrais organo-minéraux par la méthode d'Anne modifiée (Original, 2025).

Figure 16 : Matière organique parla méthode de perte au feu (Original, 2025).

Figure 17 : spectre IR des engrais 1,2,3,4,5 et 6 (Original, 2025).

Figure 18 : spectre IR des engrais 7,8,9,10,11 et 12 (Original, 2025).

Figure 19 : spectre IR comparatif des 12 engrais superposés (Original, 2025).

Figure 20 : pourcentage de germination des graines de cresson pour les trois doses de dilution des engrais (%) (Original, 2025).

Figure 21 : Indices de germination des graines de cresson pour les dilutions 25 % et 50 % (Original, 2025).

Figure 22 : indices de germination des graines de cresson pour les dilutions 50 % et 100 % (Original, 2025).

Figure 23 : Représentation des longueurs moyenne des racines (Original, 2025).

Tableau 01 : comparaison des bandes infrarouges caractéristiques des 12 engrais organo-minéraux

L'Algérie, comme de nombreux pays, fait face à la gestion de grandes quantités de matières organiques résiduelles (MOR) issues de divers secteurs, tels que l'agriculture, l'industrie alimentaire, la gestion des déchets municipaux et la construction. Ces résidus, qui représentent une part significative des déchets produits chaque année, proviennent principalement de l'agriculture et de l'industrie alimentaire. Dans certaines régions, ces matières organiques sont directement recyclées sur le terrain, notamment dans les exploitations agricoles où le compostage et d'autres formes de valorisation sont mis en œuvre. Cependant, une grande partie des résidus agricoles et alimentaires, en raison de leur humidité et de la présence de pathogènes, ne peut être utilisée localement sans risque pour la santé publique et l'environnement [1].

En plus de ses avantages en termes de gestion des déchets et de fertilisation des sols, le biochar est un matériau particulièrement intéressant pour la chimie de l'environnement. Grâce à ses propriétés physiques et chimiques uniques, il joue un rôle clé dans la gestion des contaminants présents dans les sols et les eaux. Sa structure poreuse et sa forte surface spécifique lui permettent d'adsorber des substances chimiques indésirables, telles que les métaux lourds, les pesticides et d'autres polluants organiques. De plus, le biochar peut contribuer à la rétention des nutriments dans les sols, réduisant ainsi les risques de lixiviation et de contamination des nappes phréatiques. Ces propriétés font du biochar un outil précieux dans les stratégies de dépollution et de gestion durable des sols et des eaux [2].

Afin d'améliorer la fertilité et favoriser la croissance des plantes, des engrais organo-minéraux (Compost, fientes, zéolite, biochar, phosphate naturel, NPK, Urée, MAP, K_2SO_4 , bentonite) ont été élaborés et caractérisés pour une utilisation adéquate et assuré une production végétale de qualité .

Selon INRAE(Institut National de la Recherche agronomique) leur emploi excessif ou inadapté peut engendrer des impacts environnementaux notables, tels que la pollution des eaux souterraines par les nitrates, l'eutrophisation des milieux aquatiques ou encore la dégradation de la qualité des sols.

En dépit de ses avantages potentiels, la filière des engrais organo- minéraux en Algérie reste encore en développement. Il existe un besoin urgent d'outils de caractérisation, de normes et de réglementations adaptées, afin de soutenir son implantation stable et efficace. Des recherches sur les propriétés des engrais dérivés de matières organiques et minérales

locales pourraient constituer un levier important pour la valorisation des déchets organo-minéraux en Algérie.

Ce travail comporte trois chapitres :

Le premier chapitre comprend une étude bibliographique sur les travaux antérieurs effectués sur les engrais organo- minéraux.

Le deuxième chapitre est dédié à l'exploitation de techniques expérimentales appliquées aux engrais organo- minéraux.

Dans le chapitre trois le protocole expérimental mis en œuvre lors de l'étude sera présenté, et les résultats obtenus seront exposés et confrontés aux résultats des travaux déjà publiés par différents auteurs.

Enfin, une conclusion clôturera ce mémoire suivi de quelques perspectives pour d'éventuelles expérimentations sur terrain agricole.

I. Généralités sur le matériau bois

Le bois est le matériau constituant l'essentiel du tronc, des branches et des racines de l'arbre. Le tronc est constitué de bois et d'écorce. La qualité du bois est liée à sa structure macroscopique et microscopique, mais aussi à la structure des parois cellulaires déterminée par ses constituants chimiques. Cette qualité peut être mesurée dans l'aubier et dans le duramen. Une coupe transversale à la figure (1) permet de distinguer l'aubier et le duramen. Dans cette figure, la partie adjacente à l'écorce (aubier) a une couleur plus claire que la partie interne (duramen). Pour de nombreuses espèces de bois, cette distinction de couleur entre l'aubier et le duramen n'existe pas. Le bois exerce donc trois grandes fonctions dans l'arbre : la conduction de la sève brute des racines vers les branches, le soutien mécanique et la réserve des substances nutritives. Le bois d'aubier est le lieu de réserve en eau et en substances nutritives. C'est la partie physiologiquement active du xylème qui permet le transport de la sève brute des racines vers la cime [5].

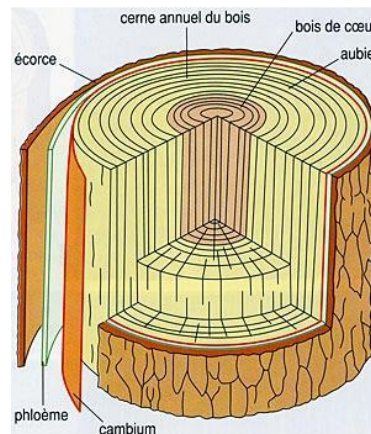


Figure 1 : Structure macroscopique d'un arbre - détails des différentes parties du tronc [6].

Le bois est un matériau biodégradable principalement composé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Ses propriétés dépendent non seulement de son anatomie, mais aussi de sa composition chimique à travers la nature des trois biopolymères qui le constituent (cellulose, lignine et hémicelluloses) ainsi que de la présence des extractibles en plus ou en moins grande quantité selon les essences considérées. Les études sur le matériau bois nécessitent donc des différents niveaux d'observation en fonction du type de recherche envisagée. On trouve ainsi des recherches menées à l'échelle macroscopique, microscopique et au niveau moléculaire.

I.1. Composition élémentaire du bois

L'analyse élémentaire du bois fait ressortir trois éléments principaux que sont le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. La répartition massique de ces éléments varie selon les espèces de bois, nous pouvons considérer que la proportion de carbone présente dans le bois est comprise entre 49 et 53 %, la proportion d'oxygène entre 40 et 44 % et il y a entre 6 et 7 % d'hydrogène. L'ensemble de ces éléments représentent environ 59 % du bois vert. Le bois contient également une faible proportion de matières minérales ou cendres, souvent inférieure à 1 % tout comme la teneur en azote [7]. L'eau présente dans le bois peut varier de 15 à 45 %. Certains auteurs[8] ont estimés une valeur massique moyenne de 50 % de carbone et 6 % d'hydrogène, la « molécule bois » aurait donc pour formule brute approchée : $\text{CH}_{1,44}\text{O}_{0,66}$, soit une masse moléculaire équivalente de 24 g.mol⁻¹ pour le bois anhydre. Selon l'essence et/ou le lieu de récolte, les bois ont des teneurs variables en matières minérale (Ca, Mg, K, Na, Fe, P, etc.) [9]

I.2. Composition chimique du bois

La composition chimique du bois est complexe et très hétérogène. Le bois est essentiellement composé de trois biopolymères : de cellulose, d'hémicelluloses, de lignine mais aussi d'extractibles. Ces éléments sont les principaux composants macromoléculaires des parois cellulaires et représentent environ 95 % en masse des composés présents dans le bois. A ces trois principaux constituants viennent s'ajouter des composés minoritaires à faible poids moléculaires tels que les substances minérales et les extractibles. Ils sont qualifiés d'extractibles car ils peuvent être extraits du bois grâce à des solvants plus ou moins neutres. La proportion relative des différents constituants varie en fonction des essences de bois, de la localisation dans la paroi cellulaire, de son âge, de la saison de récolte et des conditions de récolte.

I.3. Transformation d'un matériel végétal en charbon actif

Le charbon actif est utilisé dans la purification du gaz, la purification de l'eau, le traitement des eaux usées, la médecine, filtres à air comprimé, l'épuration de l'air ainsi que dans de nombreuses autres applications. Nous le retrouvons le plus souvent en traitement d'affinage d'eaux potables ou d'eaux industrielles de haute pureté, dans ce cas le charbon actif fixe les micropolluants organiques (souvent à l'origine de goûts et des saveurs désagréables) présents dans l'eau.

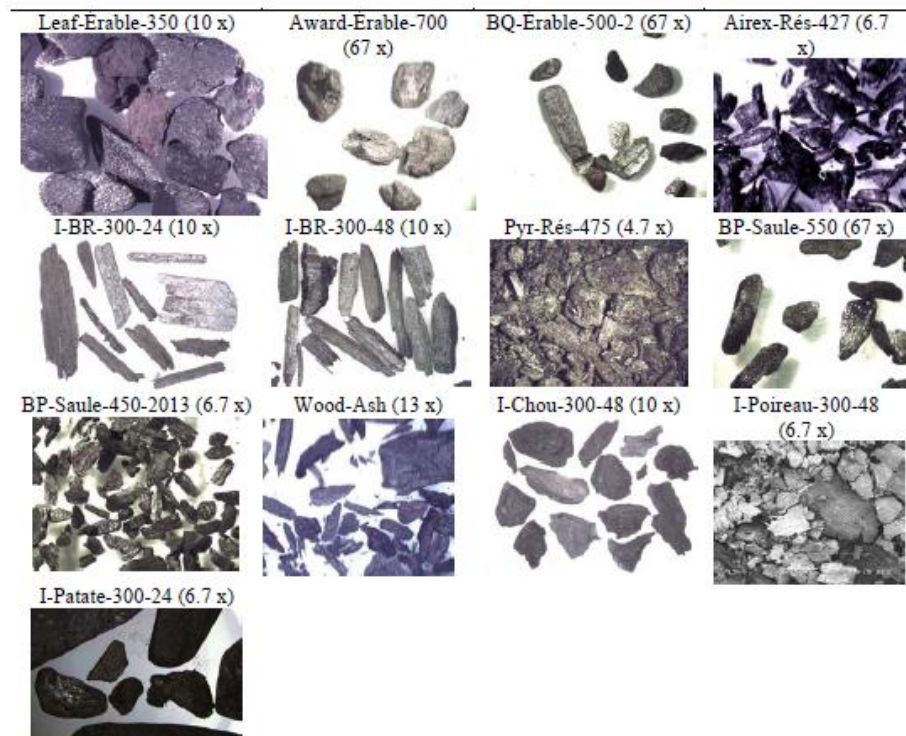


Figure 2 : Quelques photos des biochars.[10]

I.3.1. Processus de carbonisation de la matière végétale

I.3.1.1. Pyrolyse ou carbonisation

La pyrolyse ou la carbonisation est un processus exothermique dans lequel un échantillon est soumis à des températures élevées sous atmosphère inerte, de manière à obtenir un produit carboné solide, ainsi que des composés volatils (liquides et gazeux). Cette étape de pyrolyse a pour but d'obtenir un matériau fortement carboné avec une microporosité rudimentaire qui pourra ensuite être développée dans le processus d'activation. La méthode de carbonisation utilisée affectera l'activation et la qualité du charbon final.

Dans l'étude de la pyrolyse, différents facteurs externes et internes au matériau lui-même vont influencer le processus de pyrolyse. Les paramètres de commandes influençant le plus le processus de pyrolyse sont la vitesse de chauffage ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$), la température finale ($^{\circ}\text{C}$) et le temps de séjour (min). Les variables internes (propres au matériau) sont la conductivité thermique du matériau, la taille de particule et la décomposition thermique des composants chimiques [11].

I.4. Structure et nature chimique de la surface des charbons actifs

La structure et la nature chimique d'un charbon actif évoluent au cours des processus de carbonisation et d'activation. Les processus de polymérisation et de polycondensation débutent vers 400 °C, avec une augmentation de la teneur en carbone sous la forme de cycles aromatiques. En continuant à chauffer, la structure devient de plus en plus poreuse, ce qui provoque une compression sur les parois des différents pores et par conséquent diminue leur volume. Au-delà de 1000 °C, on aboutit à une structure cristalline de type graphitique. En revanche l'ordre dans lequel les feuillets sont arrangés est moins parfait que dans le cas du graphite.

La structure d'un charbon actif contient des feuillets polyaromatiques, appelés plans basaux, croisés qui contiennent différents groupes fonctionnels. La capacité d'adsorption d'un charbon activé est due à l'existence d'un volume poreux et de groupe fonctionnels à sa surface.

Les pores sont généralement classés suivant leurs tailles. La classification recommandée par l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), les regroupe en trois catégories, les micropores (< 2 nm), les mésopores (2 à 50 nm) et les macropores (> 50 nm) Les macropores sont essentiellement ouverts vers l'extérieur de la particule de l'adsorbant. Les pores de transition (mésopores) sont reliés aux macropores et ils contrôlent le passage des molécules à adsorber vers les micropores. Les charbons actifs utilisés pour la séparation en phase liquide ont des tailles de pores distribuées autour ou supérieures à 3 nm tandis que ceux utilisés en phase gazeuse ont des tailles de pores inférieures. La surface spécifique (500 à 2000 m².g⁻¹ suivant les cas) des charbons actifs est essentiellement non polaire, même si une légère polarité peut se produire par une oxydation de surface. En conséquence, ils n'ont pas besoin de séchage préalable et adsorbent de préférence les composés organiques non polaires ou parfaitement polaires. Ils sont fréquemment utilisés pour la récupération des vapeurs de solvants et d'hydrocarbures, la décoloration de sucres, la purification de l'eau, l'élimination d'odeur, etc[12].

II. Propriétés physiques et chimiques des biochars

Les biochars, produits par pyrolyse de la biomasse, présentent une série de propriétés physiques et chimiques uniques qui les rendent intéressants pour diverses applications environnementales et agricoles. Ces propriétés varient selon la matière première utilisée, les conditions de pyrolyse et les traitements appliqués au biochar.

II.1. Propriétés physiques

II.1.1. Surface spécifique

La surface spécifique est l'une des propriétés physiques les plus importantes du biochar. Elle est mesurée en m^2/g et détermine la capacité d'adsorption du biochar. Plus cette surface est grande, plus le biochar est capable d'adsorber des substances, telles que des métaux lourds, des nutriments ou des contaminants organiques. La surface spécifique varie en fonction de la température de pyrolyse et du matériau d'origine. Par exemple, les biochars produits à des températures élevées tendent à avoir une surface spécifique plus élevée [13].

II.1.2. Porosité

Le biochar possède une structure poreuse qui joue un rôle crucial dans sa capacité à retenir l'eau et les nutriments. Cette porosité est directement liée à la température et à la durée de la pyrolyse. Une structure poreuse bien développée est également essentielle pour l'adsorption de contaminants chimiques, ce qui rend le biochar utile dans les stratégies de dépollution [14].

II.1.3. Densité apparente

La densité apparente du biochar est généralement faible, ce qui en fait un matériau léger et facile à transporter. Cette densité dépend de la matière première utilisée et des conditions de pyrolyse, et elle influence la facilité avec laquelle le biochar peut être manipulé dans des applications agricoles ou environnementales [15].

II.1.4. Capacité d'échange cationique (CEC)

La CEC du biochar détermine sa capacité à retenir des ions cationiques (comme le calcium, le magnésium, et le potassium), ce qui est crucial pour la fertilité des sols. Une CEC élevée permet au biochar de retenir plus de nutriments pour les libérer progressivement dans le sol, réduisant ainsi la lixiviation des nutriments et améliorant la santé du sol [16].

II.1.5. Contenu en cendres

Le contenu en cendres du biochar est un indicateur de la quantité de matières minérales restantes après pyrolyse. Un faible contenu en cendres est généralement souhaitable car il signifie que le biochar est composé principalement de carbone, avec un faible potentiel de contamination minérale [17].

II.2. Propriétés chimiques

II.2.1. Composition chimique du carbone

Le biochar est principalement constitué de carbone, avec une proportion variable (50-90 %) en fonction du matériau de départ et des conditions de pyrolyse. Cette haute teneur en carbone est responsable de la stabilité du biochar, ce qui lui permet de séquestrer le carbone dans le sol pendant des décennies voire des siècles [14].

II.2.2. pH

Le pH du biochar est généralement alcalin, ce qui peut être bénéfique pour améliorer l'acidité des sols. Le pH exact varie en fonction de la matière première et de la température de pyrolyse. Ce pH peut influencer la solubilité des métaux lourds et d'autres contaminants dans les sols et les eaux, ce qui permet d'utiliser le biochar comme outil de gestion de la qualité de l'eau et des sols [18].

II.2.3. Présence de contaminants

Selon la matière première et les conditions de pyrolyse, le biochar peut contenir des contaminants tels que des métaux lourds, des pesticides ou des produits chimiques organiques. Cependant, ces contaminants peuvent être piégés dans les pores du biochar, ce qui peut réduire leur biodisponibilité dans les sols. De plus, ces substances peuvent être immobilisées, réduisant ainsi leur potentiel de migration dans les nappes phréatiques [19].

II.2.4. Propriétés adsorbantes

En raison de sa structure poreuse et de sa surface spécifique élevée, le biochar est un excellent adsorbant pour une gamme de polluants, y compris les métaux lourds, les

pesticides, et les produits pharmaceutiques. La capacité du biochar à adsorber ces contaminants dépend des groupes fonctionnels à sa surface (comme les groupes hydroxyles et carboxyles), ainsi que de ses propriétés de porosité [13].

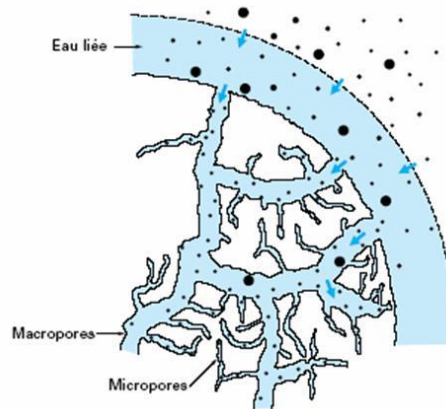


Figure 3 : Schéma simplifié du principe d'adsorption en phase liquide sur une particule de charbon actif.

II.2.5. Stabilité chimique

La stabilité chimique du biochar est l'un de ses avantages majeurs en tant qu'agent de séquestration du carbone. Grâce à sa structure organique résistante et à sa faible réactivité chimique, le biochar est stable pendant des décennies dans le sol, réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre [15].

III. Structure chimique et groupes fonctionnels du biochar

Le biochar est un matériau carboné obtenu par pyrolyse de biomasse en conditions de faible teneur en oxygène. Sa structure chimique est complexe et dépend des conditions de pyrolyse, notamment de la température et du temps de traitement.

III.1. Groupes fonctionnels à la surface du biochar

À la surface du biochar, on trouve divers groupes fonctionnels tels que :

- **Groupes hydroxyles (R–OH)**
- **Groupes carboxyles (R–COOH)**
- **Groupes phénoliques (R–OH attachés à un noyau benzénique)**

- **Groupes amines** ($-\text{NH}_2$)
- **Groupes lactones** ($\text{R}-\text{C}-\text{O}-\text{O}-\text{C}-\text{R}$)
- **Groupes peroxydes** ($\text{R}-\text{O}-\text{O}-\text{R}$)

Ces groupes fonctionnels influencent les propriétés chimiques et la réactivité du biochar, notamment sa capacité d'échange cationique (CEC), son pH et sa réactivité avec divers polluants [20].

IV. Mécanismes d'adsorption des polluants par le biochar

Le biochar élimine les polluants par une combinaison de mécanismes tels que l'adsorption, l'échange d'ions, la complexation et la précipitation.

IV.1. Adsorption physique et chimique

La structure poreuse et la surface spécifique du biochar lui permettent d'adsorber une large gamme de contaminants. Les polluants organiques, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les pesticides, sont piégés dans ses micropores par des forces de Van der Waals. La chimisorption, impliquant des liaisons covalentes ou hydrogène, se produit lorsque les molécules de polluants interagissent avec les groupes fonctionnels, tels que les hydroxyles ($-\text{OH}$), les carboxyles ($-\text{COOH}$) et les amines ($-\text{NH}_2$) à la surface du biochar. Ces groupes améliorent la liaison des polluants inorganiques, y compris les métaux lourds comme le plomb (Pb) et le cadmium (Cd). L'efficacité de l'adsorption est influencée par le pH, la force ionique, la température et la présence de contaminants concurrents. Par exemple, des conditions acides favorisent l'adsorption des métaux lourds cationiques en augmentant l'attraction électrostatique vers les surfaces négativement chargées du biochar [21].

IV.2. Échange d'ions

Les processus d'échange d'ions permettent au biochar de remplacer ses ions de surface (par exemple, H^+ , Na^+ , K^+) par des ions polluants. Ce mécanisme est particulièrement efficace pour l'élimination des espèces cationiques, telles que l'ammonium (NH_4^+), le zinc (Zn^{2+}) et le cuivre (Cu^{2+}). Le biochar dérivé de matières premières riches en nutriments, telles que le fumier animal, présente une capacité d'échange cationique (CEC) plus élevée en raison de son abondance en groupes fonctionnels négativement chargés et en constituants minéraux. L'efficacité de l'échange d'ions dépend de facteurs environnementaux, tels que les ions

concurrents et le pH de la solution, qui influencent la charge de surface et la disponibilité des ions échangeables du biochar [22].

IV.3. Complexation

Les groupes fonctionnels à la surface du biochar interagissent avec les polluants, formant des complexes stables qui immobilisent les contaminants. Par exemple, les groupes carboxyles et phénoliques se lient aux métaux tels que le chrome (Cr) et le mercure (Hg) pour former des structures chélatées, réduisant ainsi leur solubilité et leur mobilité. Ce mécanisme est particulièrement pertinent dans le traitement de l'eau et la réhabilitation des sols, où l'immobilisation des éléments toxiques est essentielle pour la santé environnementale et publique [23].

IV.4. Précipitation

Les composants minéraux présents dans le biochar, tels que le calcium (Ca) et le magnésium (Mg), favorisent la précipitation de certains polluants en composés insolubles. Par exemple, les ions phosphate dans les eaux usées peuvent réagir avec le calcium pour former de l'hydroxyapatite, éliminant efficacement les phosphates par précipitation minérale. De même, les ions fluorure interagissent avec le magnésium pour former des précipités stables, atténuant ainsi leur impact environnemental [24].

V. Modifications du biochar pour améliorer son efficacité

Pour optimiser les performances du biochar en tant qu'adsorbant, diverses méthodes de modification ont été développées :

- **Dopage au soufre (S)** : L'introduction de soufre dans le biochar crée des groupes fonctionnels tels que C-S, C-S-C, C=S, C-S-O et des cycles soufrés. Ces modifications améliorent l'activité catalytique du biochar et sa capacité à éliminer des polluants spécifiques.
- **Dopage au bore (B)** : Le dopage au bore modifie la distribution électronique et ajuste les propriétés physico-chimiques du biochar, offrant ainsi davantage de sites de défauts. Le biochar dopé au bore présente une surface spécifique accrue et une augmentation des groupes fonctionnels contenant de l'oxygène, améliorant ainsi sa capacité à adsorber des ions métalliques tels que Fe(II)[25].

VI. Applications environnementales du biochar

Le biochar est utilisé dans diverses applications environnementales :

- **Traitement des sols pollués** : Le biochar est appliqué pour immobiliser les métaux lourds et les contaminants organiques dans les sols, réduisant ainsi leur biodisponibilité et leur toxicité.
- **Traitement des eaux usées** : Le biochar est utilisé pour éliminer les polluants tels que les métaux lourds, les produits pharmaceutiques et les produits chimiques industriels des eaux usées, contribuant ainsi à la purification de l'eau.
- **Réduction des émissions de gaz à effet de serre** : L'incorporation de biochar dans les sols peut réduire les émissions de gaz à effet de serre en séquestrant le carbone et en améliorant la santé du sol [26].

VII. Engrais

Un engrais est une substance, d'origine naturelle ou synthétique, apportée au sol ou aux plantes dans le but de fournir les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance. Il contient généralement un ou plusieurs éléments fertilisants majeurs (azote, phosphore, potassium), ainsi que parfois des oligo-éléments (zinc, cuivre, fer...) [27].

VII.1. Engrais organique

Les engrais organiques sont issus de matières naturelles végétales ou animales (fumier, compost, fientes, déchets agroalimentaires...). Ils sont riches en matière organique et libèrent lentement les nutriments grâce à l'activité biologique du sol. Ils améliorent également la structure physique, la capacité de rétention d'eau et la fertilité biologique du sol [28].

VII.2. Engrais minéral

Les engrais minéraux (ou chimiques) sont obtenus par extraction ou synthèse industrielle. Ils contiennent des éléments nutritifs sous forme minérale directement assimilables par les plantes. Ils ont une action rapide mais peuvent entraîner des effets négatifs sur l'environnement s'ils sont mal utilisés (lessivage, pollution des nappes) [29].

VII.3. Engrais organo- minéral

Les engrais organo- minéraux sont des produits hybrides composés d'une fraction organique (compost, fumier, biochar, etc.) et d'une fraction minérale (urée, superphosphate, K_2SO_4 , etc.). Cette combinaison permet de tirer profit des effets synergiques : amélioration de la structure du sol, libération lente et prolongée des nutriments, meilleure rétention et biodisponibilité des éléments fertilisants [30].

VIII. Propriétés physico-chimiques des engrais

- **Humidité** : elle influence la conservation, la stabilité et la capacité de libération des éléments.
- **pH** : détermine l'acidité ou la basicité de l'engrais. Un pH neutre est souvent recherché.
- **Conductivité électrique (CE)** : reflète la concentration en sels solubles. Trop élevée, elle peut être phytotoxique.
- **Matière organique (MO)** : améliore la capacité de rétention d'eau, favorise l'activité microbienne et la stabilité du sol.
- **Capacité de rétention d'eau** : essentielle pour les substrats horticoles.
- **Teneur en éléments nutritifs (N, P, K)** : mesurée pour garantir l'efficacité fertilisante.
- **C/N ratio** : important pour évaluer le potentiel de minéralisation ou d'immobilisation de l'azote [31].

IX. Autres caractéristiques

IX.1. Présence de biochar

Agit comme rétenteur d'éléments nutritifs, adsorbant de polluants, et support de micro-organismes bénéfiques [32].

IX.2. Teneur en cendres

Renseigne sur la fraction minérale totale [33].

X. Propriétés biologiques (germination, phytotoxicité)

Mesurées via des tests de phytotoxicité sur plantes cibles comme le cresson ou le blé, permettant d'évaluer l'innocuité et l'efficacité de l'engrais [34].

XI. Les enjeux environnementaux liés aux engrais chimiques

Il est urgent de développer des alternatives comme les engrais organo- minéraux

- Pollution des nappes phréatiques par les nitrates,
- Émissions de gaz à effet de serre (N₂O),
- Dépendance aux ressources non renouvelables (phosphate minier, énergie fossile) [35]

XII. La législation des engrais en Algérie

En Algérie, la réglementation des engrais est encadrée principalement par le **décret exécutif n° 06-362 du 26 octobre 2006**, qui fixe les conditions de fabrication, d'importation, de commercialisation et de contrôle des engrais et amendements minéraux et organiques. Ce décret vise à garantir la qualité agronomique des produits fertilisants, à protéger l'environnement et la santé humaine, et à assurer la traçabilité des produits utilisés en agriculture.

Il impose notamment

- L'obligation d'enregistrement des engrais auprès du ministère de l'Agriculture,
- Le respect de normes physico-chimiques (teneurs minimales en N, P₂O₅, K₂O, MO, etc.),
- Des exigences en matière d'étiquetage (composition, mode d'emploi, précautions),
- La réalisation d'analyses en laboratoires agréés,
- Le suivi des effets sur les sols et les cultures.

En complément, le Centre de Contrôle de la Qualité et de Conditionnement des Produits Agricoles (CCQCPA) est chargé de la vérification de la conformité des engrais mis sur le marché national [35].

II.1. Introduction

Les échantillons étudiés (Figure 05) sont des engrais organo-minéraux à base de compost, zéolite, bentonite, fiente, NPK 15 15 15, Phosphates naturels, MAP, Urée, K_2SO_4 dont la caractérisation figure et le biochar en annexe (Tableau 01).

La formulation de ces engrais organo-minéraux figure en annexe (Tableau 02)



Figures 05 : préparation des douze échantillons utilisés (Original, 2025).

II.2. Caractéristiques physico-chimique et biologique des engrais

Afin d'évaluer la qualité des engrais organo-minéraux, plusieurs analyses ont été réalisées pour caractériser ses propriétés physico-chimiques et biologiques :

II.2.1. Caractéristique physique des engrais

II.2.1.1. Mesure du taux d'humidité

Le taux d'humidité ou le pourcentage en eau dans les engrais est mesuré par la pesée des échantillons avant et après étuvage à 105° pendant 24h.

Le taux d'humidité est donné par la relation suivante :

$$\text{TH}\% = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_0} * 100$$

m_0 : la masse du creuset à vide en (g)

m_1 : la masse du creuset et la prise d'essai avant étuvage (g)

m_2 : la masse du creuset et le résidu après étuvage (g)

➤ Mode opératoire

Pour effectuer cette expérience, j'ai suivi la méthode décrite ci-dessous :

- ✓ Peser les creusets à vide et noter m_0
- ✓ Peser 2g de chaque échantillon de diamètre 250 μm
- ✓ Introduire les échantillons dans les creusets et les numéroter puis prendre la masse m_1
- ✓ Placer les creusets dans une étuve à 105°C pendant 24h dans le but d'obtenir des échantillons anhydres
- ✓ Sortir les échantillons de l'étuve et les laisser refroidir à l'air libre
- ✓ Peser les échantillons à nouveau et noter m_2
- ✓ Calculer le taux d'humidité (TH)

II.2.1.2. Mesure de la conductivité électrique

La conductivité électrique mesure la capacité d'une substance à permettre le passage d'un courant électrique qui est illustrée dans la figure (06). Elle est directement liée à la concentration en ions dissous dans le substrat et permet d'évaluer sa salinité. Une conductivité trop élevée peut être nuisible aux plantes.

➤ Mode opératoire

- ✓ Peser 1g de chaque échantillon et dissoudre dans 100ml d'eau distillée puis les filtrer à l'aide d'un papier filtre
- ✓ Immerger l'électrode du conductimètre dans la solution et laisser se stabiliser
- ✓ Mentionner la valeur affichée
- ✓ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée avant et après chaque mesure



Figure 06 : Mesure de la conductivité électrique après dissolution des échantillons
(Original, 2025).

II.2.1.3. Mesure du pH

Le pH est un paramètre qui exprime l'acidité ou la basicité d'une solution sur une échelle de zéro à quatorze. Il influence fortement la disponibilité des nutriments pour les plantes. Un pH trop acide ou trop basique peut limiter la croissance végétale figure (07).

➤ Mode opératoire

- ✓ Peser 10g de chaque échantillon
- ✓ Ajouter 100ml d'eau distillée
- ✓ Agitation magnétique pendant 15min
- ✓ Laisser décanter pendant 2h
- ✓ Immerger l'électrode du pH mètre dans la phase liquide puis dans la phase solide et noter les valeurs obtenues
- ✓ Rincer l'électrode avec de l'eau distillée avant et après chaque mesure.

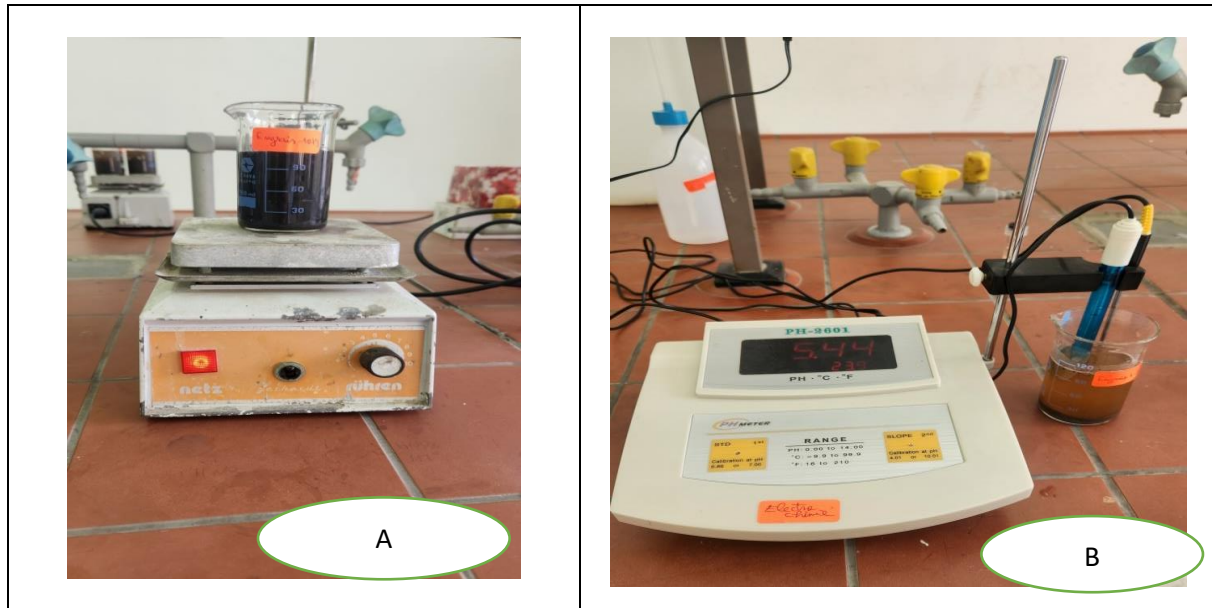


Figure 07 : Agitation magnétique et mesure du pH de chaque échantillon respectivement (Original, 2025).

II.2.1.4. Dosage de carbone organique (Méthode d'Ann modifiée)

Cette analyse gravimétrique permet de quantifier la fraction minérale résiduelle après combustion de l'échantillon. Un taux de cendres élevé indique une forte teneur en minéraux figure (08).

Le carbone organique est l'un des principaux constituants des déchets organiques compostés. Le carbone total est composé du carbone organique total (COT) et du carbone minéral sous forme de carbonates et bicarbonates [28]. La matière organique contient en moyenne 58% de carbone organique [29].

En milieu acide, on oxyde le carbone par une solution de bichromate de potassium. L'excès de bichromates non réduit est dosé par une solution réductrice de sel de Mohr (0.2N) en présence de diphénylamine [30].

Réactifs

- ✓ Sel de Mohr 78.5g de sel de Mohr+ d'eau distillé (bouillie et refroidie) +20ml d'acide sulfurique et ajuster avec d'eau distillée à 1L.
- ✓ Bichromate de potassium $K_2Cr_2O_7$ en poudre
- ✓ Fluorure de sodium (NAF) en poudre.
- ✓ Acide sulfurique concentré.

- ✓ Eau distillée
- ✓ Diphénylamine : dissoudre dans un bécher 0.5g de Diphénylamine dans 100ml d'acide sulfurique concentré et verser cette solution avec précaution dans un flacon de verre brun contenant 20 ml d'eau distillée.
- **Mode opératoire**
 - ✓ Peser 0.125g de chaque échantillon et le transvaser dans un Erlen-Meyer ;
 - ✓ Ajouter 20ml d'acide sulfurique concentré(H_2SO_4) et 3,2g de Bichromate de potassium ;
 - ✓ Dissoudre en chauffant légèrement.
 - ✓ Ajouter 30ml d'acide sulfurique concentré(H_2SO_4) à l'aide d'une éprouvette graduée
 - ✓ Mettre à ébullition pendant 5min à compter de l'apparition de la première goutte de condensation.
 - ✓ Laisser refroidir.
 - ✓ Transvaser dans une fiole jaugée de 200ml et laver l'Erlen-meyer avec 150ml d'eau distillée compléter au volume.
 - ✓ Après homogénéisation, prélever à l'aide d'une pipette 20ml de solution et les transvaser dans un erlen-meyer de 250ml.
 - ✓ Diluer avec environ 150ml d'eau distillée.
 - ✓ Ajouter 3 à 4 gouttes de diphénylamine, c'est un indicateur qui fait passer la solution du brun violacé au bleu vert.
 - ✓ Ajouter 1.5 g de fluorure de sodium (NAF) en poudre. Ce sel permet d'obtenir un virage plus sensible en rendent les ions ferriques inactifs par formation de sel peu dissociable.
 - ✓ Ajouter 1ml d'acide sulfurique(H_2SO_4).
 - ✓ Titrer en agitant avec la solution de sel de Mohr 0.2N. La couleur passe de brun violacé au bleu vert. Soit N le nombre de sels de Mohr versés et en comparant notre résultat de dosage de carbone à un témoin qui a été réalisé dans les mêmes conditions.

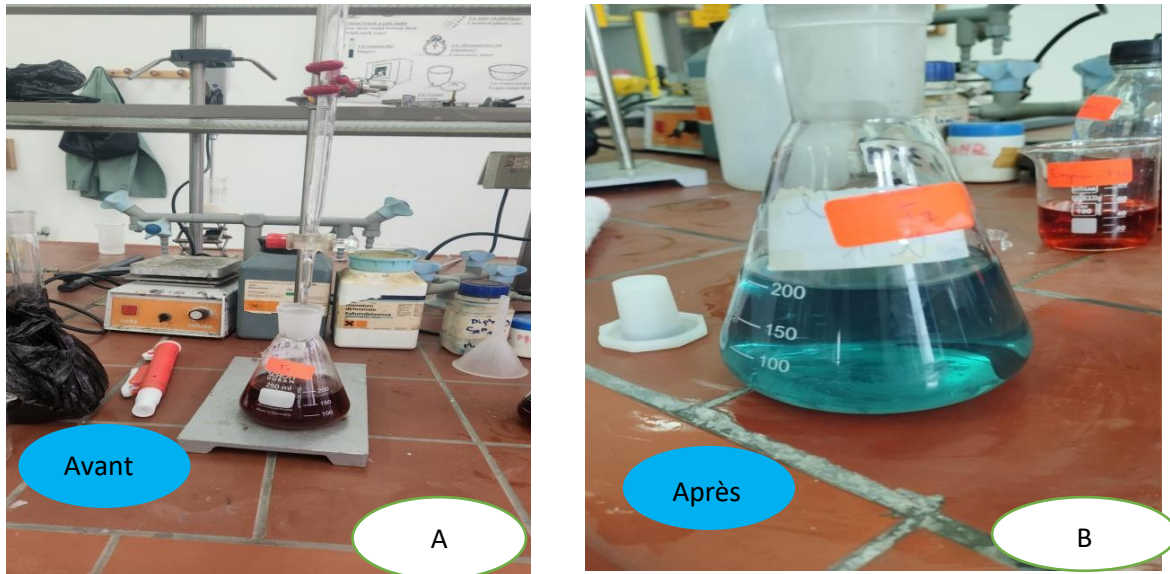


Figure 08 : Passage du brun violacé au bleu vert après dosage de la solution par sel de Mohr (Original, 2025).

II.2.2. Caractéristique Chimique des engrais

II.2.2.1. Dosage de carbone organique (Méthode perte au feu)

La teneur en matière organique totale (MO en % de MS) a été déterminée par la perte en masse lors de la calcination de l'échantillon à 550°C pendant 5 heures figure (09).

- **Principe**

20g de chaque échantillon a été séché dans l'étuve à 105°C pendant 48 heures avant qu'il soit mis dans le four à moufle dans le but d'obtenir un échantillon anhydre.

- **Mode opératoire**

- ✓ Peser le poids des creusets vides à l'aide d'une balance de précision et noter le poids m_0 .
- ✓ Mettre 5g de chaque l'échantillon anhydre dans des creusets en porcelaines dont on connaît préalablement le poids et noter la masse totale m_1 .
- ✓ Introduire les échantillons dans un four à moufle à température 550°C pendant 5 heures jusqu'à l'obtention d'une cendre blanche. Afin de calciner la matière organique (MO).
- ✓ Retirer les creusets du four et les mettre dans un dessiccateur.
- ✓ Laisser refroidir jusqu'à température ambiante.
- ✓ Peser les creusets a nouveaux puis noté la m_2 .

- ✓ Le taux de cendres est obtenu après destruction de la matière organique par calcination au four à moufle.
- ✓ Le taux de matière organique est d'abord calculé en pourcentage par la formule suivante :

$$\%MO = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} * 100$$

Où :

m_0 : masse de creuset vide en (g).

m_1 : masse de creuset plus le poids du compost en (g).

m_2 : masse de creuset plus le poids de l'échantillon après calcination (g).

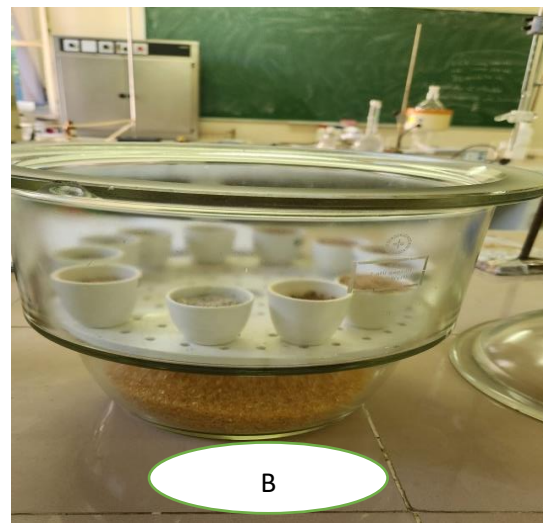


Figure 09 : pesé et mise à dessiccateur des échantillons respectivement (Original, 2025).

II.3. Analyse du Spectroscopie infrarouge (FTIR)

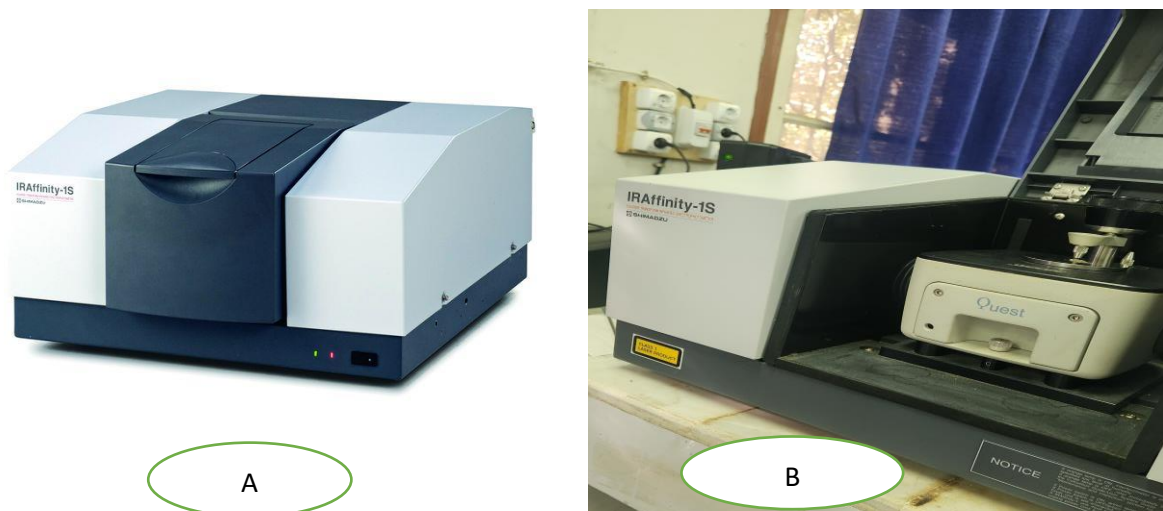
Cette technique d'analyse spectroscopique permet d'identifier les groupes fonctionnels présents dans le substrat en détectant les vibrations caractéristiques des liaisons chimiques. Cela donne des indications sur la composition organique et minérale du engrais organo-minéraux (figure 10)

Cette technique d'analyse a été réalisé avec un Spectromètre IR | IRAffinity-1S, un instrument d'analyse de pointe destiné aux applications industrielles et de recherche des entreprises. Alliant performance, simplicité d'utilisation et robustesse, ce produit est optimisé pour offrir une expérience utilisateur sans pareil.

➤ **Mode opératoire**

Avant l'analyse en proche infrarouge, les échantillons sont préalablement broyés, tamisés, puis séchés. Un alignement est effectué toutes les heures afin d'assurer la stabilité de l'appareil. Chaque échantillon est ensuite placé dans un Vial en verre spécial, où la poudre est tassée pour éviter d'éventuelles perturbations du faisceau liées à la dispersion des particules.

L'acquisition des spectres se fait avec une résolution de 8 cm^{-1} , après un temps de stabilisation d'environ 30 secondes. Le spectromètre génère ensuite un spectre moyen. Cette technique permet d'obtenir des résultats à la fois quantitatifs, grâce à l'intensité des bandes d'absorption, et qualitatifs, en identifiant des absorptions spécifiques correspondant aux caractéristiques chimiques du matériau analysé.



Figures 10 : Spectrophotomètre Proche Infrarouge ; Spectrophotomètre IRAffinity-1S

II.4. Test de phyto-toxicité des engrais

Ce test biologique évalue l'impact du substrat sur la germination des plantes. Il permet de détecter la présence éventuelle de composés inhibant la germination ou le développement des racines, la figure 11 représente quelques étapes de test de phyto-toxicité des engrais organo-minéraux.

➤ **Mode opératoire :**

- ✓ Diluer 4g d'engrais dans 20ml d'eau distillée.
- ✓ Agitation électrique pendant une heure.

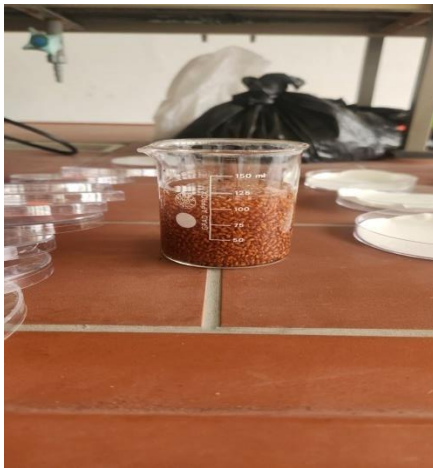
- ✓ Agitation puis centrifugation pendant 15 minutes.
- ✓ Filtration juste après avoir fait la centrifugation.
- ✓ Prélever le filtrat et diluer à différents pourcentages :25% 75% 100%
- ✓ La première série 5ml, on rajoute 5ml de la solution mère.
- ✓ La deuxième série 2.5ml, on rajoute 7.5ml de la solution mère.
- ✓ La troisième série c'est 10 ml de la solution mère.
- ✓ Mettre 10 graines de cresson dans chaque boîte pétrie à deux répétitions pour chaque pourcentage.
- ✓ Mettre dans l'étuve à condition thermique idéal.
- ✓ Après 2 jours, les graines ont germé, on mesure leurs racines.



1/ Agitation électrique après dilution



2/ Filtration après centrifugation



3/ Trempage des graines de cresson dans l'eau distillé pour activer la germination en les hydratant



4/ Mise de 10 graines de cresson dans chaque boîte pétrie à deux répétions pour chaque pourcentage



5/ Mise à l'étuve



6/ Après 2 jours, mesure de la longueur des racines

Figure 11 : Illustration de quelques étapes de test de phytotoxicité des engrais (Original, 2025).

III. Caractérisation physico-chimique des engrais

III.1. Caractérisation physique des engrais organo-minéraux

1-Taux d'humidité

L'ensemble des résultats du taux d'humidité de ces engrais sont présentés au niveau de la figure 12.

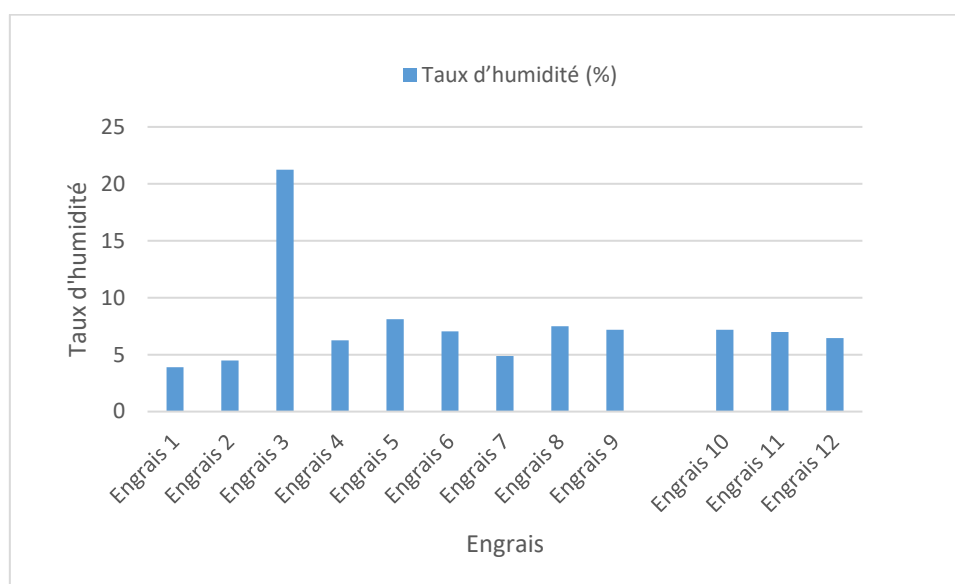


Figure 12 : Taux d'humidité des 12 engrais

L'histogramme ci-dessus illustre les taux d'humidité mesurés des douze échantillons d'engrais organo-minéraux. On observe que, mis à part, l'échantillon 3 qui affiche un taux de 21,25 %, tous les engrais présentent une humidité inférieure à 10 %. Cette distribution indique une bonne maîtrise du processus de séchage pour la majorité des formulations, ce qui contribue à la stabilité du produit et limite les risques de dégradation ou de fermentation [27].

Selon la norme AFNOR, le taux d'humidité ne doit pas dépasser 25 % pour garantir une bonne conservation. Ainsi, l'ensemble des échantillons est conforme à cette exigence, avec une attention particulière à porter sur l'échantillon 3, dont l'humidité élevée pourrait affecter la conservation à long terme. Globalement, ces résultats traduisent une qualité technologique satisfaisante des engrais étudiés.

III.2. Caractérisation chimique des engrais organo-minéraux

III.2.1. Conductivité électrique

Sur la figure 13 sont représentés les valeurs de la conductivité électrique des douze engrais organo-minéraux étudiés à $T= 21^{\circ}\text{C}$

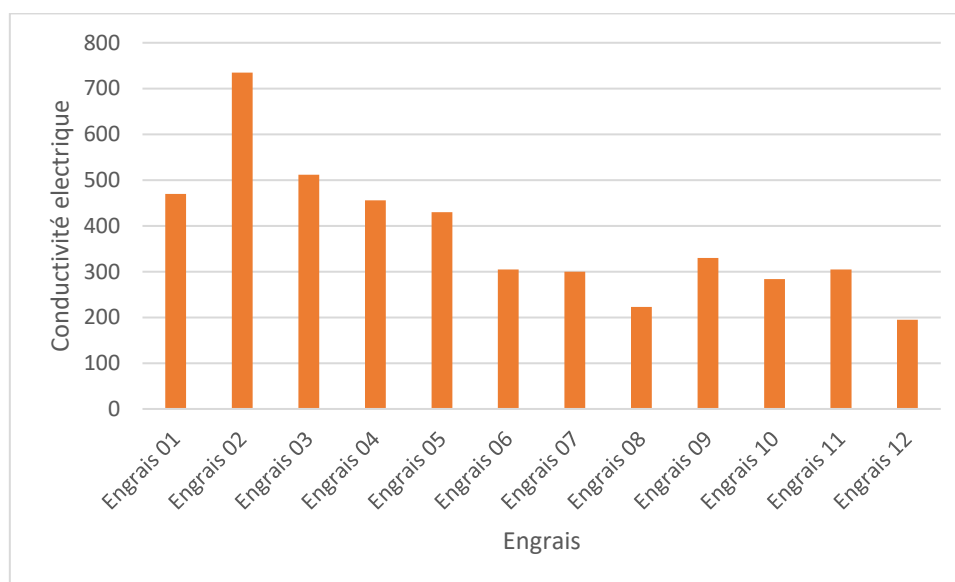


Figure13 : Valeurs de la conductivité électrique des engrais organo-minéraux à 21°C

Les valeurs varient de **195,1 à 735 $\mu\text{S/cm}$** . La conductivité électrique (CE) renseigne sur la teneur en sels solubles, un paramètre important à surveiller car une CE élevée peut induire un stress osmotique, limitant l'absorption de l'eau et des nutriments par les plantes. Selon les lignes directrices du CCME (2005) [28], une CE inférieure à **4000 $\mu\text{S/cm}$** est considérée comme acceptable pour les engrais organiques. Tous les échantillons analysés se situent largement en dessous de ce seuil, indiquant une faible salinité et donc une bonne compatibilité avec les sols agricoles. L'échantillon 2 présente la valeur la plus élevée (735 $\mu\text{S/cm}$), ce qui pourrait être lié à la nature des intrants utilisés, mais reste conforme à la norme.

III.2.2. pH

Les valeurs du pH des 12 engrais organo-minéraux à T=23.2°C figurent au niveau de la figure 14.

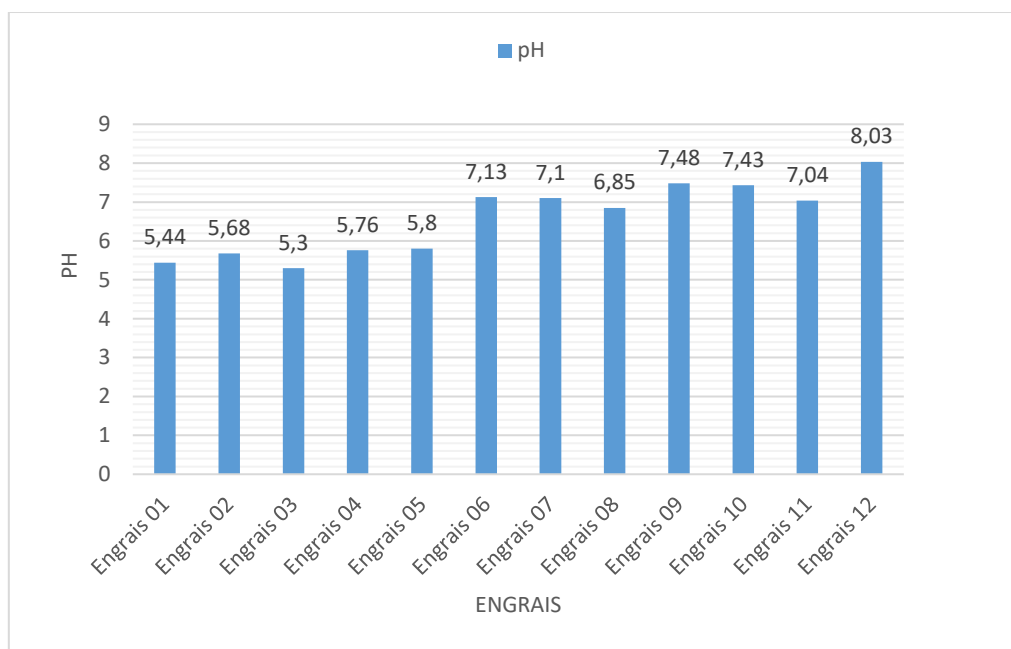


Figure14 : Valeurs du pH des engraisorgano- minéraux

Les valeurs de pH des douze engrais organo-minéraux analysés, ont varié de **5,30 à 8,03**. Selon la **FAO (2000) [29]**, le pH des engrais solides doit être compris entre **5,5 et 8,5** pour garantir une bonne efficacité agronomique et limiter les effets négatifs sur le sol. Les engrais **1 et 3 (5.3 et 5.44)** ont un pH légèrement acide, en dessous de cette norme, ce qui peut influencer la disponibilité de certains éléments comme le phosphore. En revanche, les engrais **4 à 12** respectent la plage recommandée, ce qui indique une meilleure compatibilité avec les sols agricoles. Ces résultats soulignent l'importance de contrôler le pH dès la formulation des engrais.

III.2.3. Teneur en matière organique des engrais par la méthode d'Ann modifiée

La mesure du carbone organique des engrais organo- minéraux permet de calculer la teneur en matières organiques de ces derniers.

En admettant que le carbone représente environ 58% de la matière organique totale. Le résultat du dosage permet donc d'évaluer la teneur en matière organique du sol figure (15)

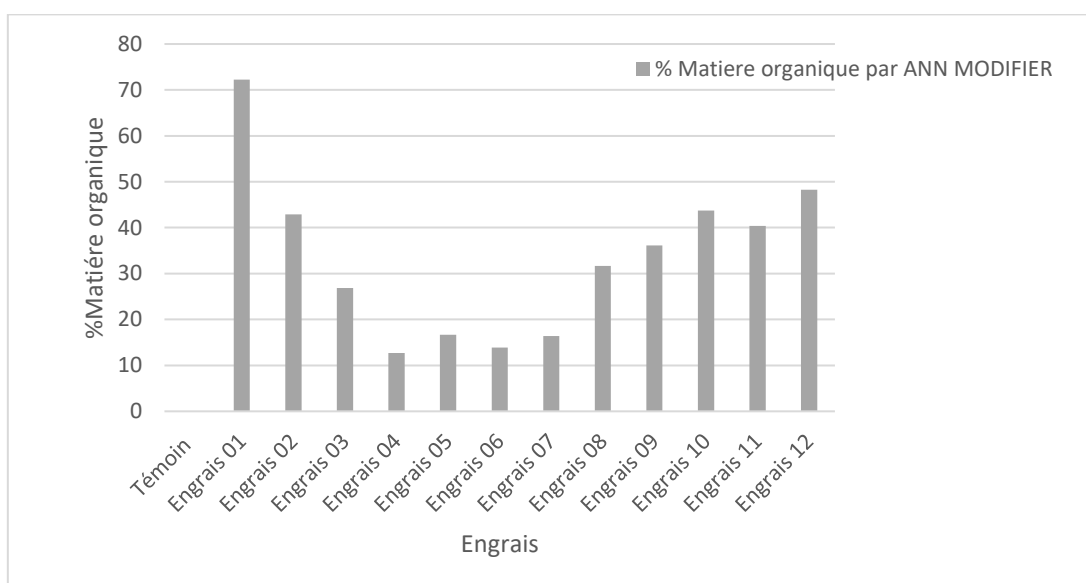


Figure 15 : Teneurs en matière organique des engrais organo-minéraux par la méthode d'Anne modifiée

Les résultats obtenus par la méthode d'Anne modifiée montrent que le pourcentage de matière organique varie de **12,69 % à 48,23 %** selon les échantillons. Cette variation s'explique par la nature et la proportion des matières premières utilisées dans chaque formulation, telles que le compost, les fientes ou le biochar. Les engrais 12, 10, 2 et 11 affichent les teneurs les plus élevées en matière organique, ce qui est favorable à l'amélioration de la structure du sol, à l'activité microbienne et à la rétention en eau. En revanche, l'échantillon 4 (12,69 %) reste inférieur au seuil recommandé. Selon les recommandations du **Comité européen de normalisation (CEN/TR 13097:2010)**[30], un engrais organique devrait contenir au moins 15 % de matière organique pour être considéré comme efficace sur le plan agronomique. À ce titre, la majorité des échantillons respectent cette exigence, ce qui traduit une bonne qualité organique globale des produits analysés.

III.2.4. Teneurs en matière organique par perte au feu

La figure 16 illustre la teneur en matière organique engrais organo-minéraux, déterminée par la méthode de la perte au feu.

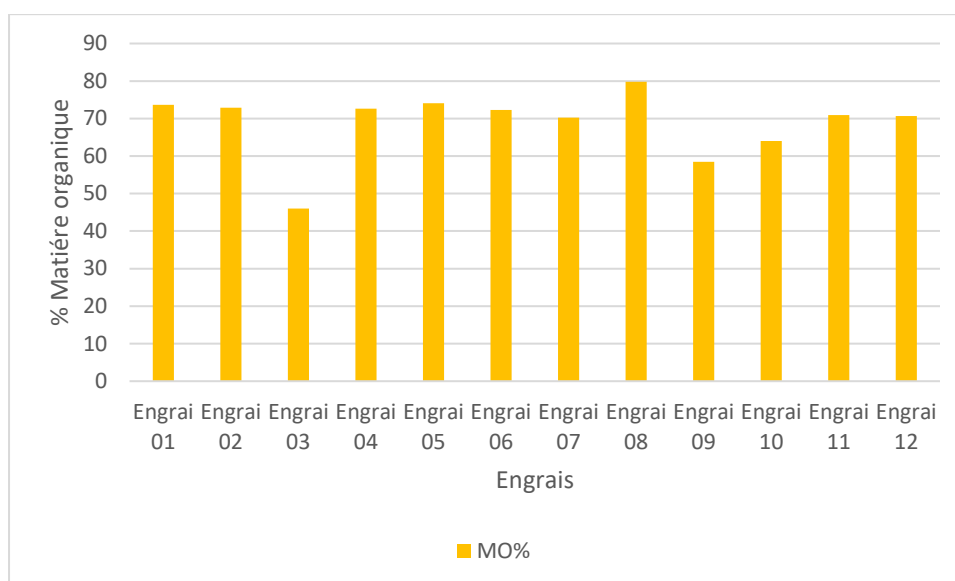


Figure 16 : Matière organique par la méthode de perte au feu

Les résultats montrent une variation notable, allant de **46,03 % à 79,82 %**, indiquant une composition organique globalement élevée. Ces écarts traduisent les différences de formulation entre les échantillons, notamment la nature des intrants utilisés (composts, fientes, biochar, etc.), qui influencent directement la richesse en matière organique. Conformément au **Règlement (UE) 2019/1009 [31]**, un produit fertilisant peut-être classé comme amendement organique s'il contient au moins 20 % de matière organique sur matière sèche. Tous les échantillons analysés respectent largement ce seuil, ce qui témoigne de leur qualité agronomique et de leur aptitude à améliorer les propriétés physico-chimiques des sols, telles que la rétention d'eau, la structure, et l'activité biologique. Dans une optique de gestion durable des sols, cette richesse organique constitue un atout favorable à la fertilité à long terme, ce qui est essentiel dans le contexte environnemental actuel.

III.2.5. Comparaison entre la méthode d'Ann modifié et celle de la perte au feu.

La teneur en matière organique des engrais organo-minéraux a été évaluée par deux méthodes : la perte au feu et la méthode d'Anne modifiée. Les résultats montrent que la perte au feu donne systématiquement des valeurs plus élevées. Cette méthode, basée sur l'oxydation thermique à 550 °C, est simple et rapide, mais peut surestimer la matière organique en incluant la perte d'autres composés volatils. En revanche, la méthode d'Anne modifiée, basée sur une

oxydation chimique, est plus sélective mais peut sous-estimer la matière organique dans les engrais contenant des formes de carbone stable comme le biochar.

Ainsi, la méthode de la perte au feu est considérée comme plus fiable pour une estimation globale, et elle est d'ailleurs recommandée par la norme **NF U44-051** pour les amendements organiques [31]. Néanmoins, l'utilisation croisée des deux méthodes peut apporter une meilleure compréhension de la qualité organique des engrais, notamment en distinguant les fractions labiles et stables du carbone.

III.3. Analyse des échantillons par spectrophotométrie Infrarouge

L'analyse par SPIR obtenue montre la présence de différentes bandes de vibration. Chaque bande d'absorption qui apparaît sur le spectre correspond à une fonction ou à un groupement chimique. Les spectres obtenus sont illustrés sur les figures (17-18-19) ci-dessous.

Résultats et discussions

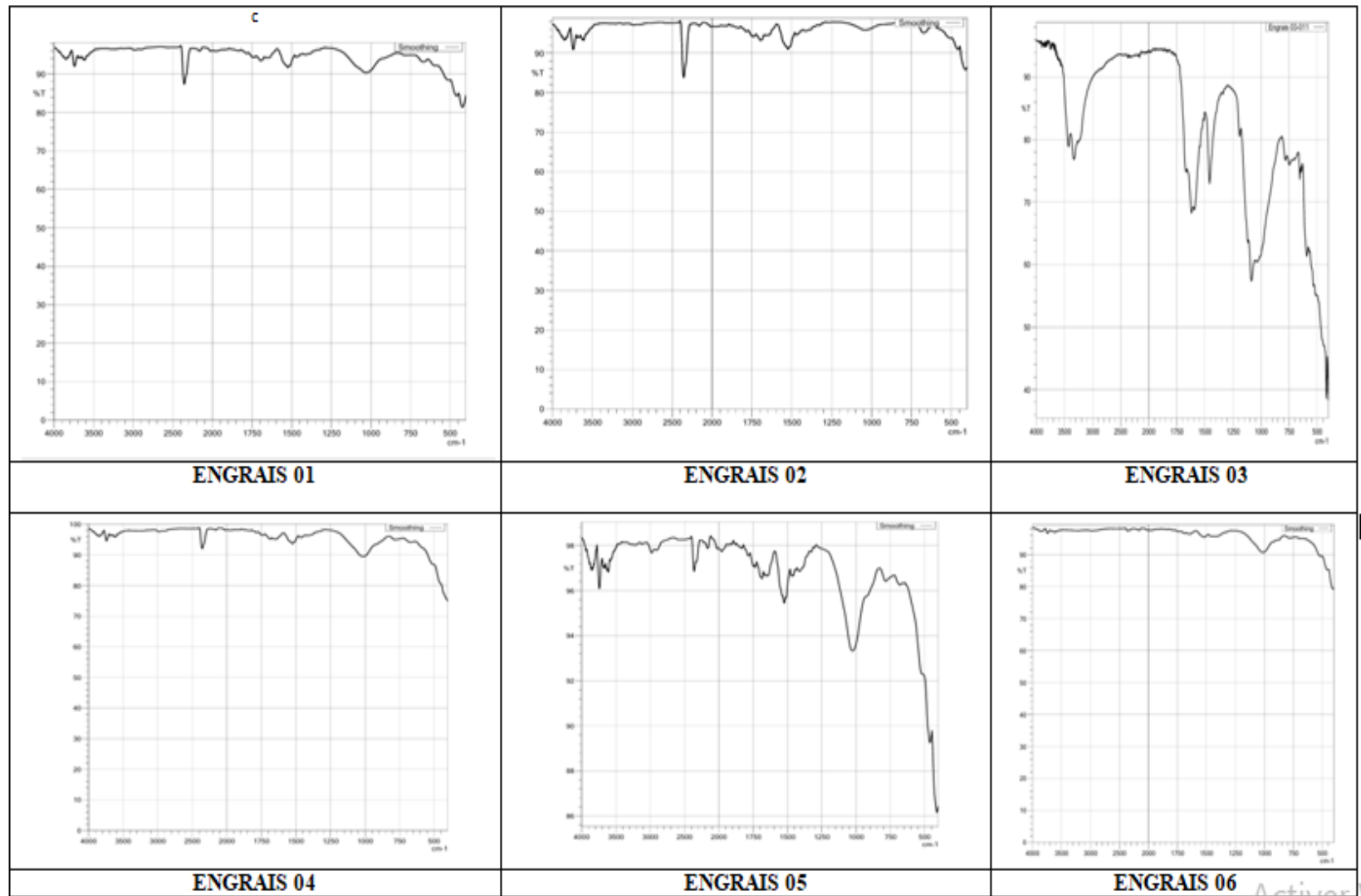


Figure 17 : spectre IR de Fourier des engrais 1,2,3,4,5 et 6

Résultats et discussions

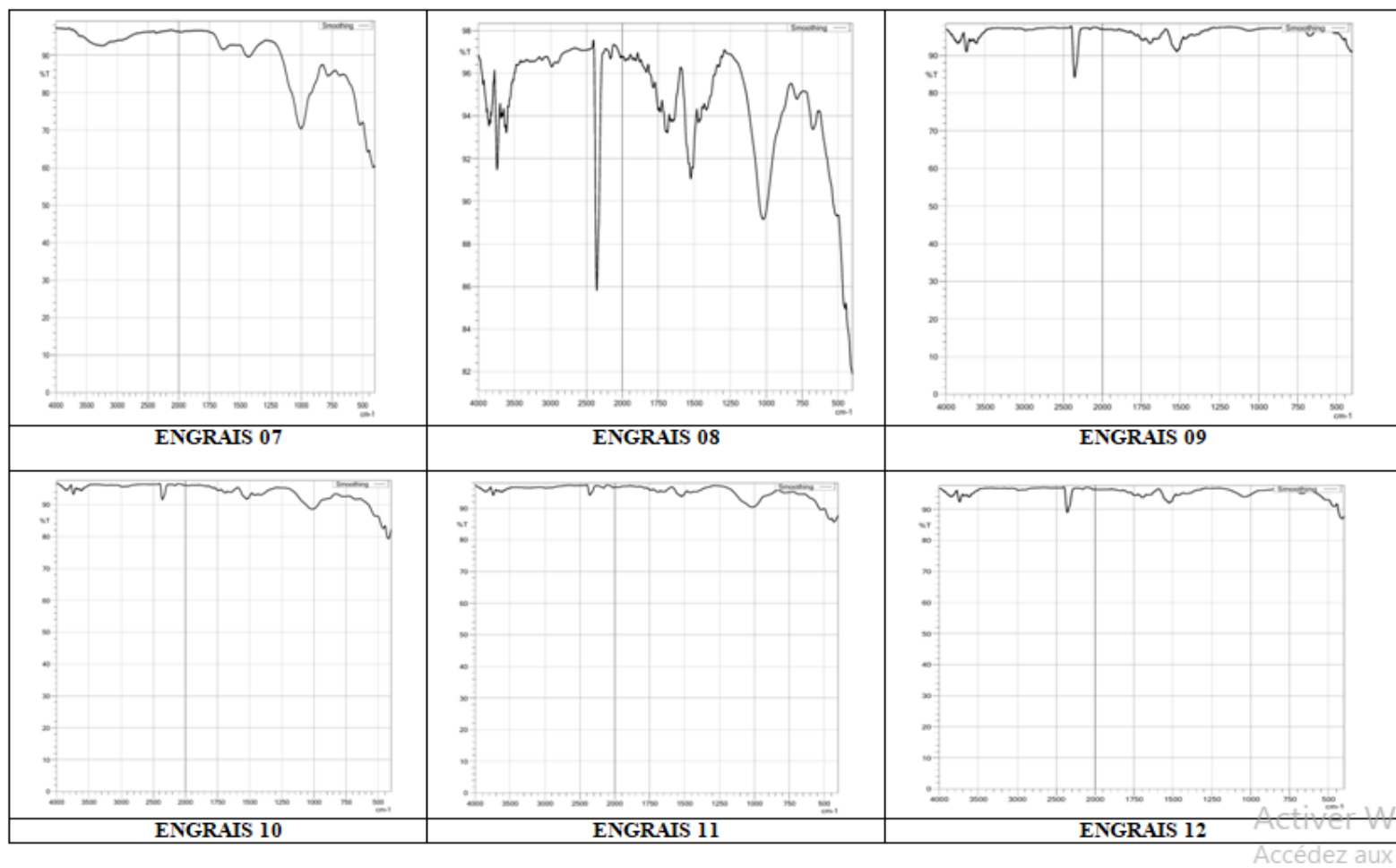


Figure 18 : spectre IR de Fourier des engrais 7,8,9,10,11 et 12

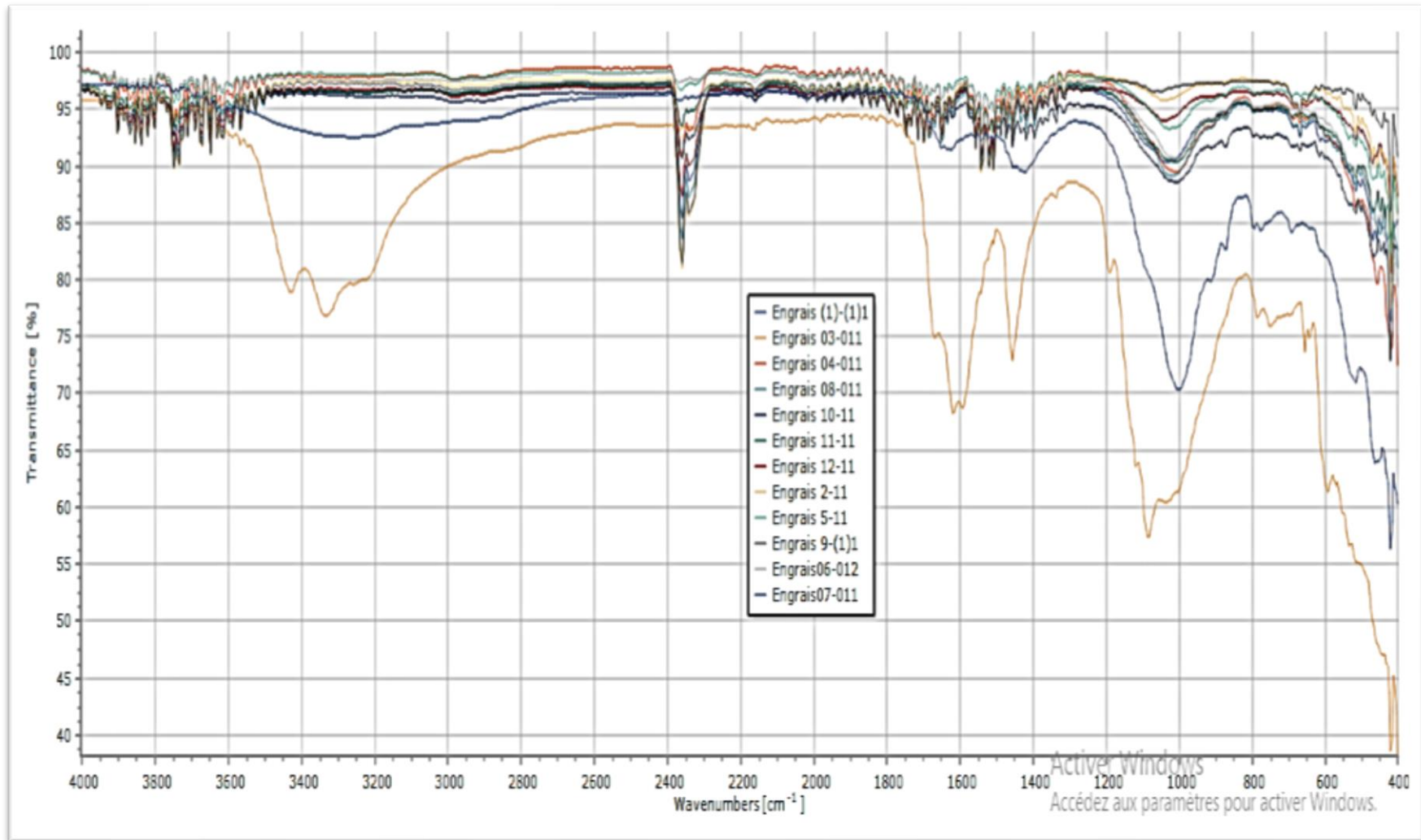


Figure 19 : spectre IR de Fourier comparatif des 12 engrais superposés

Résultats et discussions

Tableau 01 : comparaison des bandes infrarouges caractéristiques des 12 engrais organo-minéraux

Groupe spectroscopique	Engrais concernés	Bandes IR dominantes (cm ⁻¹)	Groupe(s) fonctionnel(s)	Type de vibration (ν = élongation / δ = déformation)
A – Urée dominante	03, 05, 08	~3420	N–H (urée)	ν élongation N–H (large)
		~1680	C=O (urée)	ν élongation C=O (amide I)
		~1240	C–N	ν élongation C–N (amide III)
		~1385	NO ₃ ⁻	ν_3 antisymétrique N=O
		~1100–1000	P=O / P–O / S=O	ν symétrique / asym.
		~870–900	P–O	ν secondaire (faible)
B – NPK phosphates	06, 07, 09, 10, 11	~3420	O–H (eau, argiles)	ν élongation O–H
		~2920	C–H (organiques)	ν élongation C–H (aliphatiques)
		~1640	C=O (organiques humiques)	ν élongation C=O
		~1385	NO ₃ ⁻	ν_3 antisymétrique N=O
		~1100–1000	P=O / P–O / S=O	ν symétrique / asym. (phosphates, sulfates)
		~870–900	P–O	ν secondaire
C – Organique simple	12	~3420	O–H (eau, fiente)	ν élongation O–H
		~2920	C–H	ν élongation C–H
		~1640	C=O	ν élongation C=O
		~1385	NO ₃ ⁻	ν_3 antisymétrique N=O
		~1240	C–N (fiente)	ν élongation C–N
D – Mixtes phosphatés	01, 02, 04, 08	~3420	O–H (eau, MO, argiles)	ν élongation O–H
		~2920	C–H	ν élongation C–H
		~1640	C=O	ν élongation C=O
		~1385	NO ₃ ⁻	ν_3 antisymétrique N=O
		~1100–1000	P=O / P–O / S=O	ν symétrique / asymétrique
		~870–900	P–O	ν secondaire (faible intensité)

L'analyse des spectres infrarouges des douze engrais organo-minéraux montre la présence de plusieurs bandes caractéristiques, en accord avec les constituants utilisés dans leur formulation. En effet, les différents pics identifiés correspondent aux groupes fonctionnels attendus selon la nature des matières premières. Dans l'ensemble, les spectres infrarouges confirment la cohérence entre les groupes fonctionnels identifiés et la composition chimique attendue des engrais organo-minéraux. Ces résultats valident donc l'incorporation des différents matériaux utilisés dans chaque formulation.

III.4. Test de phytotoxicité des engrais

A. Pourcentage de germination des graines de cresson

L'évaluation de la phytotoxicité des douze engrais organo-minéraux est réalisée par des tests de germination des graines de cresson arrosées par trois dilutions (25 %, 50 %, 100 %) de chaque engrais.

Après 2 jours de mise en étuve, les graines ont germées. La **figure 20** montre le pourcentage de graines germées pour chaque engrais et chaque dilution d'engrais. Le témoin a servi de référence avec un taux de germination constant de 80 %.

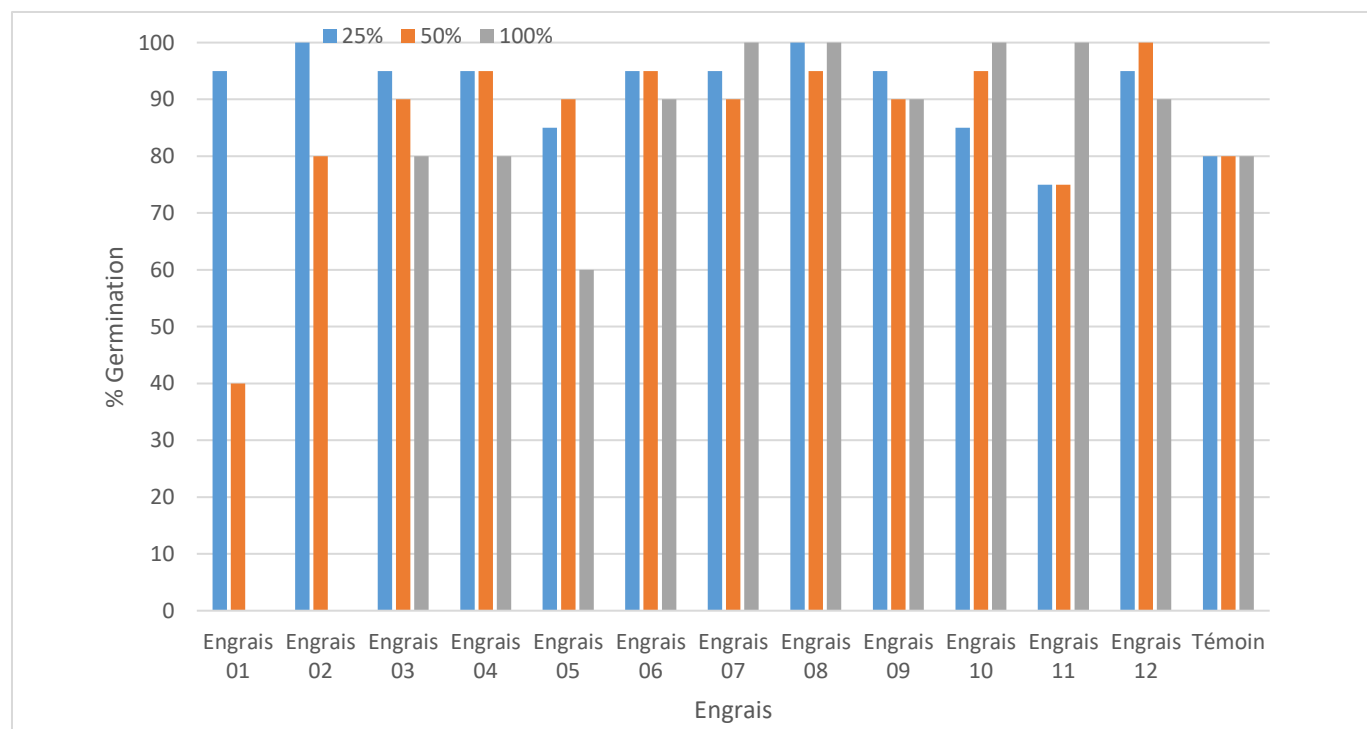


Figure 20 : pourcentage de germination des graines de cresson pour les trois doses de dilution des engrais (%).

La figure 20 montre qu'à faible concentration (25 %), la majorité des échantillons présente un taux de germination élevé, supérieur ou égal au témoin (80 %), à l'exception de l'engrais 11. Ceci indique une faible phytotoxicité de ces engrais. En revanche, à 50 %, certains engrais, notamment l'engrais 1, montrent une baisse significative du taux de germination. Cette inhibition devient plus marquée à la dilution de 100 % où les engrais 1 et 2 provoquent une inhibition totale de germination (0 %). À l'inverse, les engrais 7, 8, 9, 10, 11 et 12 conservent des taux de germination supérieurs à 90 %, suggérant un effet stimulant de la germination à l'état pur.

L'inhibition de la germination des graines de cresson pourrait être expliquée par l'existence d'une forte phytotoxicité due à la concentration élevée en composés actifs ou en sels. De plus, cette concentration élevée en sels empêcherait l'eau de pénétrer dans les graines, sachant que l'eau circule toujours du milieu hypotonique, présentant un potentiel hydrique élevé, vers le milieu hypertonique dont le potentiel hydrique est faible.

Selon Zhang *et al.* [32], un indice de germination de graines arrosées avec un compost à base de boues d'épuration inférieur à 80 % indique une phytotoxicité possible de ce compost. Ces résultats mettent en évidence la nécessité de contrôler la composition et les doses des engrais avant leur application au sol, notamment dans une optique de durabilité environnementale. De plus, il faut adapter la composition et les doses des engrais selon les besoins de la plante qui diffèrent d'une espèce à une autre.

B. Indice de germination des graines de cresson

La figure 21 illustre les indices de germination des graines de cresson (IG) en réponse aux extraits des douze engrais dilués à 25 % et 50 %.

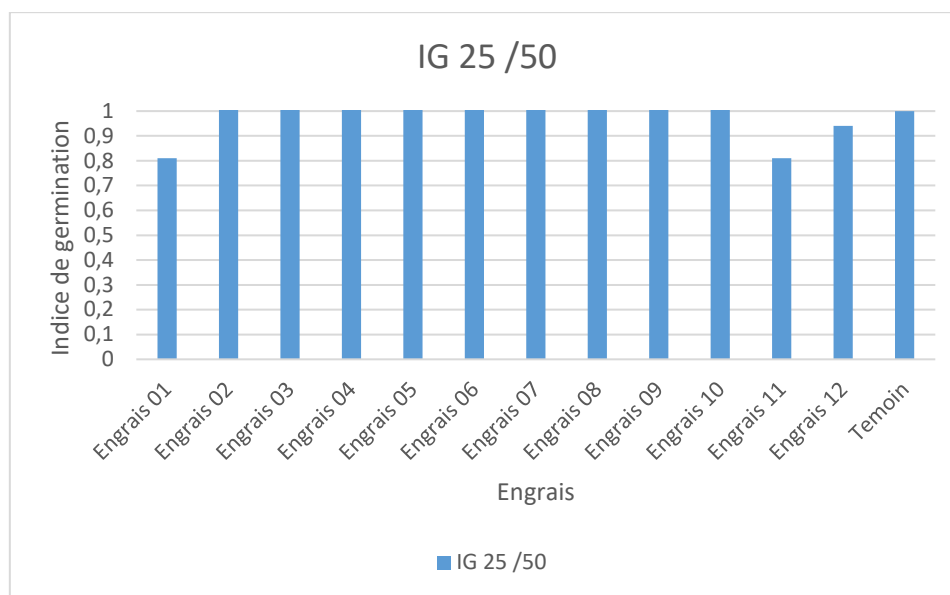


Figure 21 : Indices de germination des graines de cresson pour les dilutions 25 % et 50 %.

D'après cette figure, la majorité des échantillons présentent un IG supérieur à 1, ce qui indique une absence de phytotoxicité, voire une stimulation de la germination par rapport au témoin (IG = 1). Les engrais 4, 7, 3 et 10 affichent les valeurs les plus élevées ($\geq 1,16$), traduisant une germination élevée et une bonne croissance racinaire des graines de cresson. Ces engrais semblent présenter un potentiel agronomique intéressant. L'engrais 12, avec un IG de 0,94, reste proche du témoin. À l'inverse, les engrais 1 et 11 montrent un IG de 0,81, ce qui suggère une légère phytotoxicité à ces concentrations.

Selon Zucconiet *al.*, un IG inférieur à 0,8 est considéré comme phytotoxique, tandis qu'un IG ≥ 1 indique un effet neutre, voire même stimulant [33].

Selon nos résultats, il ressort que certains engrais, comme l'engrais 1 et 2, bien qu'ils soient riches en nutriments, ils peuvent présenter des effets inhibiteurs à certaines concentrations. Il est donc nécessaire d'évaluer, au préalable, les effets d'un engrais, selon sa concentration et selon l'espèce végétale concernée, et cela pour une application sûre et efficace.

La figure 22 illustre les indices de germination (IG) des graines de cresson à 50 % et 100 % de concentration met en évidence des effets variables selon les engrais testés.

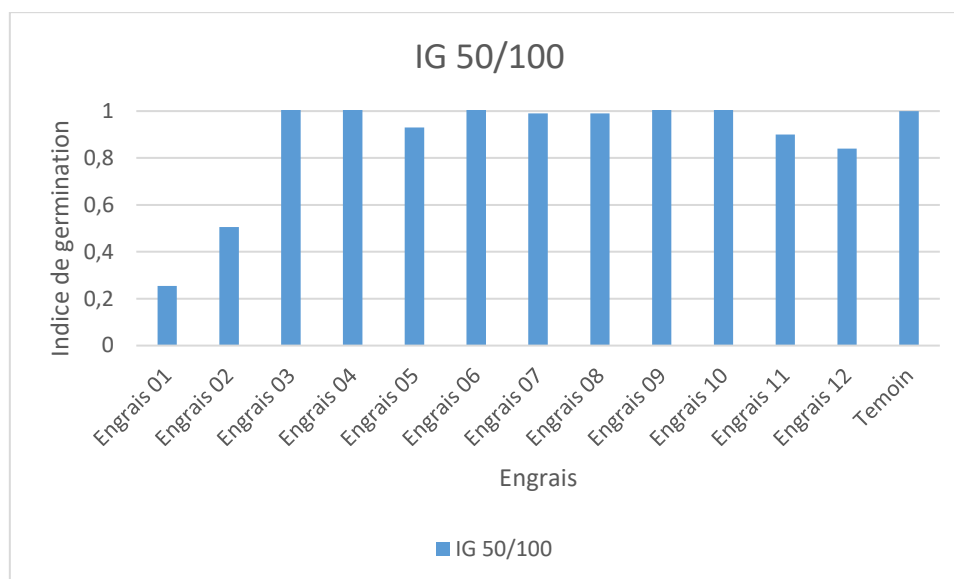


Figure 22 : indices de germination des graines de cresson pour les dilutions 50 % et 100 %.

La figure 22 montre des effets variables selon les engrais testés. Les engrais 3, 4, 6, 8, 9 et 10 affichent des $IG \geq 1$, traduisant une absence de phytotoxicité, conformément au seuil proposé par Zucconiet *al.* (1981) [33]. À l’opposé, les engrais 1 ($IG = 0,255$) et 2 ($IG = 0,505$) montrent une phytotoxicité marquée qui serait due à une accumulation de composés inhibiteurs à forte concentration.

Les engrais 5, 7, 11 et 12 présentent des IG proches ou légèrement inférieurs à 1, témoignant d’un effet faiblement inhibiteur. Ces résultats soulignent l’importance de la dilution de certains amendements organo-minéraux dans l’atténuation des effets toxiques potentiels.

A. Longueur moyenne de racines des plantules de cresson

La figure 23 représente la longueur moyenne des racines des plantules de cresson obtenue après germination des graines, en appliquant les extraits des différents engrais organo- minéraux et les différentes dilutions.

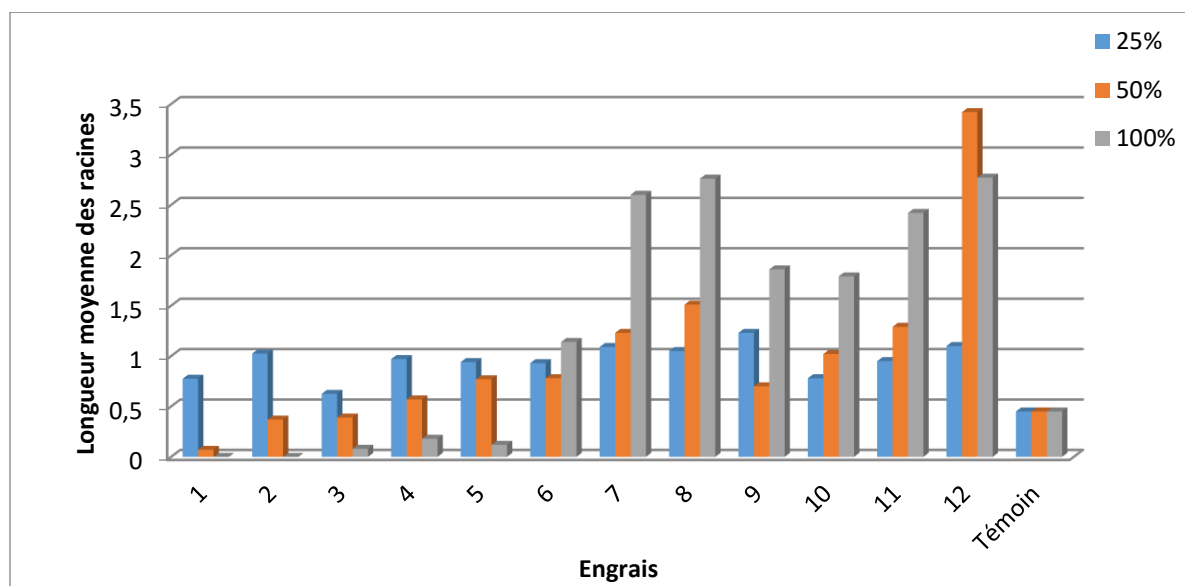


Figure 23 : Représentation des longueurs moyenne des racines

La figure met en évidence une variabilité des effets en fonction de la composition des engrais et des doses appliquées. À la dilution de 25 %, la majorité des échantillons présentent une longueur moyenne des racines supérieure à celle du témoin (0,45 cm), traduisant une absence de phytotoxicité, voire un effet biostimulant à faible concentration. À la dilution de 50 %, plusieurs formulations, notamment les engrais 7, 8, 11 et 12, stimulent significativement la croissance racinaire, tandis que d'autres, comme les engrais 1, 2 et 3, montrent des longueurs inférieures au témoin, suggérant un début d'effet toxique. À la dilution de 100 %, seuls les engrais 7, 8, 11 et 12 conservent un effet positif, alors que les engrais 1, 2 et 3 inhibent totalement ou presque totalement le développement racinaire, ce qui indique une phytotoxicité marquée. Cette inhibition pourrait être liée à une accumulation de sels minéraux, à un déséquilibre nutritionnel ou à la présence de composés organiques mal stabilisés. Selon les critères établis par Zuconiet et al. (1985), la mesure de la longueur moyenne des racines constitue un indicateur fiable et sensible pour évaluer la phytotoxicité d'un engrais, en complément du pourcentage et de l'indice de germination.

Ce travail de fin d'études avait pour objectif de caractériser douze engrais organo- minéraux à base de matières organiques (compost, fiente, biochar) et d'intrants minéraux. Les analyses physico-chimiques (pH, conductivité électrique, taux d'humidité, teneur en matière organique) ont montré que la majorité des échantillons respectent les normes en vigueur. L'analyse par spectroscopie infrarouge a confirmé la présence de groupes fonctionnels en lien avec les composants utilisés, et les tests de phytotoxicité ont révélé une bonne compatibilité biologique pour la plupart des formulations, notamment à faible concentration.

Ces résultats soulignent le potentiel agronomique et environnemental de ces engrais, en valorisant des déchets organiques autrefois sous-exploités et en réduisant les impacts négatifs sur les sols. Ils participent ainsi à une logique d'économie circulaire, en transformant des résidus agricoles et agro-industriels en produits à haute valeur ajoutée pour l'agriculture.

En contribuant à la réduction des déchets biodégradables et à la limitation de l'usage excessif des engrais chimiques, ces formulations s'inscrivent dans une démarche de gestion durable des ressources et de protection des écosystèmes.

Pour approfondir cette étude, il serait pertinent d'effectuer un dosage précis des éléments nutritifs (NPK), de réaliser des tests agronomiques en conditions réelles et d'évaluer l'effet à long terme sur la fertilité des sols et sur les rendements agricoles.

- [1] Ministère de l'Environnement (MDE). (2017). Gestion des déchets en Algérie : Stratégies et perspectives. Publication du Ministère de l'Environnement, Algérie.
- [2] Allaire, S., & Lange, M. (2013). Impact du biochar sur la fertilité des sols en conditions méditerranéennes. *Revue Agronomique d'Algérie*, 22(1), 45-60.
- [3] Taylor, G. T., et al. (2002). "Impact of Biochar on Soil Health." *International Journal of Advanced Research*, 2(4), 933–950
- [4] Pot, G. (2012). Caractérisation mécanique du bois vert au cours de sa maturation et modélisation de la réaction gravitropique de jeunes peupliers. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec.
- [5] Hazar C., Barette J.-P., Mayer J. (1996). *Mémotech Bois et Matériaux Associés*. Paris
- [6] Sjöström E. (1993). *Wood chemistry: Fundamentals and Applications*. Academic Press, Inc.
- [7] Valette P., De Choudens C. (1992). *Le bois, la pâte, le papier*. 3ème edn. Centre Technique du Papier, Grenoble, France
- [8] Taylor, G. T., et al. (2002). "Impact of Biochar on Soil Health." *International Journal of Advanced Research*, 2(4), 933–950
- [9] UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE. 2014. *Génie des Procédés* p.51
- [10] UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE. 2014. *Génie des Procédés* p.54
- [11] Sohi, S. P., et al. (2010). A review of biochar and its potential application to mitigate soil carbon loss and improve soil fertility. *Environmental Science & Technology*, 44(1), 121-132.
- [12] Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. Routledge.
- [13] Rizvi, H., et al. (2013). Biochar: A review of its impact on soil fertility and its role in carbon sequestration. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4), 2533-2542.
- [14] Zhao, L., et al. (2013). Biochar application in agriculture: A review of the effects on soil and plant growth. *Agricultural Systems*, 115, 73-85.

- [15] Chen, Y., Cheng, H., & Zhang, X. (2015). Physicochemical properties and agricultural applications of biochars. *Soil Science Society of America Journal*, 79(4), 1216-1230.
- [16] Kuzyakov, Y., et al. (2009). Biochar and soil fertility: A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(3), 221-232.
- [17] Schmidt, H.-P., et al. (2014). Biochar production and applications in environmental management. *Environmental Science & Technology*, 48(10), 5611-5620.
- [18] Mia, S., et al. (2017). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16(2), 221–235.
- [19] Mohammed, S., et al. (2018). Removal of phenol contaminants by biochar. *Biochar*, 5(1), 1–12.
- [20] Zhang, Y., et al. (2021). Boron-doped biochar for the removal of Fe(II) from aqueous solutions. *Environmental Science & Technology*, 55(10), 6693–6702.
- [21] Liu, Y., et al. (2020). Sulfur-doped biochar for the removal of bisphenol A from aqueous solutions. *Environmental Science & Technology*, 54(5), 3145–3153.
- [22] Zhao, L., et al. (2021). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. *Biochar*, 3(1), 1–13.
- [23] El-Naggar, A., et al. (2021). Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. *Biochar*, 3(1), 1–13.
- [24] Dey, D., Chatterjee, S., & Ghosh, S. (2020). *Biochar: A Useful Amendment for Sustaining Soil Environment*. SpringerLink.
- [25] HAVLIN J. L., TISDALE S. L., NELSON W. L., BEATON J. D. – *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. 8^e éd. New Jersey : Pearson, 2013.
- [26] BRADY N. C., WEIL R. R. – *The Nature and Properties of Soils*. 15^e éd. Boston : Pearson Education, 2016.

- [27] RENGEL Z. – Handbook of Soil Conditioners: Substances That Enhance the Physical Properties of Soil. Boca Raton : CRC Press, 2017.
- [28] AGEgneHU G., BASS A. M., NELSON P. N., BIRD M. I. – Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions. *Science of the Total Environment*, vol. 543, 2016, p. 295–306.
- [29] LEHMANN J., JOSEPH S. – Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation. 2^e éd. London : Routledge, 2015.
- [30] AFNOR – NF U 44-051 : Amendements organiques – Définitions et spécifications. La Plaine Saint-Denis : AFNOR, 2005.
- [31] KHAN S., et al. – Biochar as a soil amendment: Impact on soil properties and plant growth. *Environmental Sustainability*, vol. 3, 2020, p. 125–134.
- [32] JINDO K., et al. – Compost biochar interaction and its effect on plant growth. *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 32, n° 3, 2012, p. 763–772.
- [33] ZHELJAZKOV V. D., WARMAN P. R. – Source-separated municipal solid waste compost application to Swiss chard and basil. *Journal of Environmental Quality*, vol. 33, n° 2, 2004, p. 542–552.
- [34] SUTTON M. A., et al. – Our Nutrient World : The challenge to produce more food and energy with less pollution. Edinburgh : UNEP, 2013.
- [35] ALGÉRIE. – Décret exécutif n° 06-362 du 26 octobre 2006 relatif aux conditions de fabrication, d'importation, de commercialisation et de contrôle des engrais et amendements minéraux et organiques. *Journal officiel de la République algérienne*, n° 69, 29 octobre 2006, p. 8–14.

- [36] *AFNOR (2006).NF U 44-051 – Amendements organiques – Définition, spécifications et marquage.* Association Française de Normalisation, Paris, 36 p.
- [37] *CCME. (2005). Guidelines for Compost Quality.* Canadian Council of Ministers of the Environment.
- [38] *FAO (2000). Fertilizers and Their Efficient Use. FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 9.* Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [39] *CEN/TR 13097:2010 – Characterization of sludges — Good practice for sludge utilisation in agriculture.* European Committee for Standardization
- [40] *Union européenne. (2019). Règlement (UE) 2019/1009 du Parlement européen et du Conseil du 5 juin 2019 établissant les règles relatives à la mise à disposition sur le marché des fertilisants UE.* Journal officiel de l'Union européenne, L170, 25.6.2019, p. 1–114.
- [41] *Zhang, L., Sun, X., Tian, Y., & Gong, X. (2018). Assessment of phytotoxicity of composted sewage sludge using seed germination and root elongation tests with Chinese cabbage (*Brassica chinensis L.*). Waste Management, 74, 388–395.*
- [42] *Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., & De Bertoldi, M. (1981). Evaluating toxicity of immature compost.* BioCycle, 22(2), 54–57.

1- Caractérisation des composants des engrais

La caractérisation des matières premières des engrais organo-minéraux sont présenté dans ce tableau (tableau 01)

Tableau 01 : Caractérisation de la matière première des engrais organo-minéraux

	pH	CE (ms/cm)	C %
Compost (1)	8,46	2,13	10,64
Compost (2)	8.28	2.51	/
Zéolite	8	0.87	/
Bentonite	8,73	0,85	/
Biochar de Bois dur	626	10,34	88

Au niveau du tableau 1 figurent quelques caractéristiques des composants des engrais organo-minéraux formulés.

Tableau 02 : Formulation des différents engrais selon leurs pourcentages.

Engrais	Compost	Fientes	Zéolite	Biochar	Phosphates naturels	NPK 15 15 15	Urée	MAP	K2SO4	Bentonite
1	+	+	+					+	+	+
2	+	+	+					+	+	+
3	+		+				+	+	+	
4	+	+	+					+	+	
5	+		+				+	+	+	+
6	+	+	+			+				
7	+	+	+			+				
8	+	+	+		+		+	+	+	
9	+			+		+				
10	+	+	+			+				
11	+	+		+		+				
12	+	+								

- **Compost**

Le compost est un amendement organique obtenu par la décomposition aérobie contrôlée de matières organiques d'origine végétale ou animale. Il améliore la structure du sol, augmente sa capacité de rétention d'eau et apporte des éléments nutritifs essentiels.

Haug, R.T., *The Practical Handbook of Compost Engineering*, CRC Press, 1993.

- **Fientes**

Les fientes de volaille sont des déjections animales riches en azote, phosphore et potassium. Elles sont utilisées comme fertilisant organique pour stimuler la croissance des plantes après un traitement approprié pour éviter les effets phytotoxiques.

Lopez-Mosquera, M.E. et al., "Fertilizing value of broiler litter: Effects of drying and pelleting", *Bioresource Technology*, Elsevier, 2008.

- **Zéolite**

La zéolite est un minéral aluminosilicaté microporeux qui améliore la capacité d'échange cationique du sol, retient l'humidité et limite les pertes d'azote sous forme ammoniacale. Mumpton, F.A., "La magie des zéolites dans l'agriculture", *Clays and Clay Minerals*, The Clay Minerals Society, 1999.

- **Biochar**

Le biochar est un charbon obtenu par pyrolyse de biomasse végétale. Il est utilisé comme amendement pour améliorer la fertilité des sols, séquestrer le carbone et favoriser la rétention d'eau et des nutriments.

Lehmann, J., Joseph, S., *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*, Routledge, 2015.

- **Phosphates naturels**

- Les phosphates naturels sont des roches sédimentaires riches en phosphore utilisées directement comme fertilisants phosphatés après broyage. Leur efficacité dépend du pH du sol et de leur solubilité.

Chien, S.H. et al., *Agronomic effectiveness of phosphate rocks for direct application*, FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin, 2003.

- **Engrais NPK 15-15-15**

- Il s'agit d'un engrais minéral complet contenant 15 % d'azote, 15 % de phosphore (P_2O_5) et 15 % de potassium (K_2O). Il fournit les nutriments essentiels au développement des cultures.

Mengel, K., Kirkby, E.A., *Principles of Plant Nutrition*, Springer, 2001.

- **Urée**

L'urée est un engrais azoté synthétique contenant 46 % d'azote, ce qui en fait l'une des sources d'azote les plus concentrées. Elle est rapidement transformée en ammoniac par hydrolyse enzymatique dans le sol.

Fageria, N.K. et al., *Nutrient Interactions in Crop Plants*, CRC Press, 2001.

• **MAP (Monoammonium phosphate)**

Le monoammonium phosphate est un engrais binaire soluble composé de 11 % d'azote et de 52 % de phosphore (P_2O_5). Il est utilisé en semis direct ou en fertigation.

Havlin, J.L. et al., *Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*, Pearson, 2013.

• **K_2SO_4 (Sulfate de potassium)**

Le sulfate de potassium est un engrais riche en potassium (50 % K_2O) et en soufre (18 % S). Il est recommandé pour les cultures sensibles au chlore. Barker, A.V., Pilbeam, D.J., *Handbook of Plant Nutrition*, CRC Press, 2007.

• **Bentonite**

La bentonite est une argile gonflante riche en montmorillonite, utilisée comme additif pour améliorer la rétention d'eau et de nutriments dans les engrais granulés.

Grim, R.E., *Clay Mineralogy*, McGraw-Hill, 1968



Figure.. : pesée des échantillons



2

Figures 09 : Mesure de 0.125g de chaque échantillon



Figure 10 : Mesure de 3.2 g de Bichromate de potassium



Figure 12 : dissoudre en chauffant légèrement



Figure 13 : Ajouter 30ml d'acide sulfurique concentré (H₂SO₄)



Figure 14 : Mettre à ébullition pendant 5min



Figure 15 : Transvaser dans des bouteilles après dilution et homogénéisation



Figure 16 : prélève de 20ml de solution et les transvaser dansun erlen Meyer de 250ml



Figure 17 : après dilution de 150ml d'eau distillé et Ajout de 3 à 4 gouttes de diphénylamine



Figure 18 : Après ajout de 1.5 de NAF et 1ml H₂SO₄, on titre avec la solution de sel de Mohr 0.2N

Figure 22 : Centrifugation des échantillons

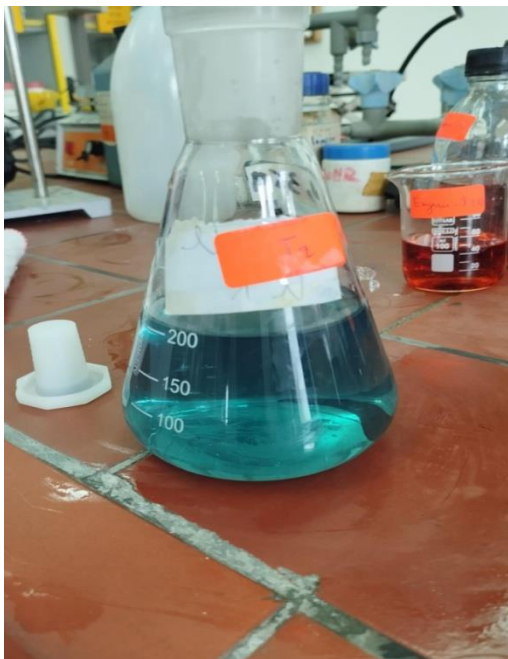


Figure 19 : passage du brun violacé aubleu vert

Tableau 03 : résultats des pH des douze engrais organo-minéraux

Type d'engrais	pH
Engrais 01	5,44
Engrais 02	5,68
Engrais 03	5,3
Engrais 04	5,76
Engrais 05	5,8
Engrais 06	7,13
Engrais 07	7,1
Engrais 08	6,85
Engrais 09	7,48
Engrais 10	7,43
Engrais 11	7,04
Engrais 12	8,03

Tableau 04 : résultats de la conductivité électrique des douze engrais organo-minéraux

Type d'engrais	Conductivité électrique (us/cm)
Engrais 01	470
Engrais 02	735
Engrais 03	512
Engrais 04	456
Engrais 05	430
Engrais 06	305
Engrais 07	300
Engrais 08	223
Engrais 09	330
Engrais 10	284
Engrais 11	305
Engrais 12	195,1

Dosage de la matière organique des engrais par la méthode d'Ann modifié :

1. Calcul du pourcentage de carbone :

Le calcul se fait selon la relation suivante :

$$C \% = \frac{(N-N')0.615*10*100}{P}$$

Sachant que :

N : V_{eq} du dosage de la solution témoin en ml

N' : V_{eq} du dosage de l'échantillon en ml

P : La masse de l'échantillon **m= 0.125g**

Tableau 05 : résultats des pourcentages de carbones

Type d'engrais	Dosage	V _{eq}		C%
Solution témoins 01	N	34.9	35	0
Solution témoin 02		35		
Engrais 01	N'	26.46		42,0168
Engrais 02		29.93		24,9444
Engrais 03		31.83		15,5964
Engrais 04		33.5		7,38
Engrais 05		33.03		9,6924
Engrais 06		33.36		8,0688
Engrais 07		33.06		9,5448
Engrais 08		31.26		18,4008
Engrais 09		30.73		21,0084
Engrais 10		29.86		25,2888
Engrais 11		30.23		23,4684
Engrais 12		29.3		28,044

2. Calcul du pourcentage de matière organique des engrais :

Le calcul se fait selon la relation suivante :

$$MO\% = \frac{100}{58} * C\%$$

En admettant que C représente environ 58% de la matière organique totale. Le résultat du dosage permet donc d'évaluer la teneur en matière organique du sol.

Tableau 06 : résultats des pourcentages de la matière organique par Ann
modifiée

Type d'engrais	Dosage	C%	MO%
Solution témoins 01	N	0	0
Solution témoin 02			
Engrais 01	N'	24,60	72,269
Engrais 02		33,94	42,904
Engrais 03		15,74	26,826
Engrais 04		7,38	12,694
Engrais 05		19,18	16,671
Engrais 06		7,87	13,878
Engrais 07		9,34	16,417
Engrais 08		18,20	31,649
Engrais 09		21,15	36,134
Engrais 10		25,58	43,497
Engrais 11		23,61	40,366
Engrais 12		28,04	48,236

Détermination du taux d'humidité

Tableau 07 : résultats des d'humidité et de matières sèches.

Engrais organo-minéraux	Matière sèche %	Taux d'humidité (%)
1-Engrais pomme de terre	96.1	3.9
2- engrais pour vignoble	95.5	4.5
3-Engrais pour vignoble	78.75	21.25
4-Engrais rempotage	93.75	6.25
5-Engrais pour agrumes	91.9	8.1
6-Engrais rempotage	92.95	7.05
7-Engrais surfaçage	95.22	4.88
8-Engrais arbres fruitiers	92.5	7.5
9-Engrais arbres fruitiers	92.8	7.2
10- Engrais rempotage	92.8	7.2
11-Engrais vignoble	93	7
12-Engrais vignobles	93.54	6.46

Détermination du taux de cendre :

Le calcul se fait par la relation suivante :

$$\%MO = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} * 100$$

Où :

m_0 : masse de creuset vide en (g).

m_1 : masse de creuset plus le poids du compost en (g).

m_2 : masse de creuset plus le poids de l'échantillon après calcination (g).

Les taux de cendre des différents engrais sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 08 : pourcentages de de matières organiques des engrais

Engrais organo-minéraux	MO% Par la méthode de la perte au feu
1-Engrais pomme de terre	73.62
2- engrais pour vignoble	72.89
3-Engrais pour vignoble	46.03
4-Engrais repotage	72.64
5-Engrais pour agrumes	74.10
6-Engrais repotage	72.26
7-Engrais surfacage	70.28
8-Engrais arbres fruitiers	79.82
9-Engrais arbres fruitiers	58.46
10- Engrais repotage	63.98
11-Engrais vignoble	70.89
12-Engrais vignobles	70.70

Test de phyto-toxicité des engrais :

La mesure des racines et les calculs des indices de germinations sont représenter dans les tableaux ci-dessous :

Engrais		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Témoin
Dose	25%	95	100	95	95	85	95	95	100	95	85	75	95	80
	50%	40	80	90	95	90	95	90	95	90	95	75	100	
	100%	0	0	80	80	60	90	100	100	90	100	100	90	

Tableau : Pourcentage de germination pour les trois doses

Engrais		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dose	25%	1,65945513	2,08	1,55	1,82	1,49	1,78	1,96	2,12	1,99	1,34	1,23	2
	50%	0,08	0,82	0,96	1,48	1,9	2,02	3,02	3,93	1,72	2,66	2,65	9,34
	100%	0	0	0,16	0,38	0,18	2,62	6,63	7,04	4,27	4,57	6,17	6,36

Tableau : Représentation des indices de germination pour les trois pourcentages

Engrais		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Dose	25%	9,5	10	9,5	9,5	8,5	9,5	9,5	10	9,5	8,5	7,5	9,5
	50%	4	8	9	9,5	9	9,5	9	9,5	9	9,5	7,5	10
	100%	0	0	8	8	6	9	10	10	9	10	10	9

Tableau : Représentation des longueurs moyenne des racines

Table IR simplifiée pour l'interprétation des spectres IR des engrais

Cette table résume les principales bandes d'absorption en spectroscopie IR associées aux groupes fonctionnels que l'on retrouve fréquemment dans les engrais minéraux et organiques.

Type de vibration	Groupe concerné	Position (cm ⁻¹)	Commentaires
N–H (élongation)	Ammonium (NH ₄ ⁺), Urée	3300–3100	Bande large, souvent doublée
C=O (élongation)	Urée, Acides organiques	1700–1630	Intense, pic net
C–N (élongation)	Urée, Amines	1350–1250	Moins intense que le C=O
NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates	1385–1365	Bande très intense
NO ₃ ⁻ (symétrique)	Nitrates	1050–1020	Bande moins intense
P=O ou P–O (élongation)	Phosphates (PO ₄ ³⁻)	1100–900	Large bande, complexe si plusieurs formes
S=O (asymétrique)	Sulfates (SO ₄ ²⁻)	1220–1140	Forte intensité
S=O (symétrique)	Sulfates (SO ₄ ²⁻)	1080–980	Bande moyenne à forte
O–H (élongation)	Eau, Acides humiques, engrais humides	3600–3200	Très large bande si présence d'eau
C–H (élongation)	Engrais organiques	3000–2850	Bandes faibles ou moyennes

Remarques

- Les engrais minéraux comme NH₄NO₃, KNO₃ ou Ca(H₂PO₄)₂ présentent des bandes dominées par les groupes NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, SO₄²⁻.
- Les engrais organiques (compost, urée, acides humiques) montrent des bandes C=O, O–H, N–H, C–H typiques.- La présence d'eau est souvent visible par une large bande autour de 3400 cm⁻¹.

Interprétation des spectres infrarouges des douze engrais organo-minéraux

Engrais 01 et 02 : Formulation : Compost, fiente, zéolite, MAP, K₂SO₄, bentonite

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O-H (élongation)	Eau, hydroxyles, argiles (zéolite, bentonite), acides humiques	Bande large liée à l'humidité, eau adsorbée, et groupes hydroxyles des argiles et matière organique
~2920	C-H (élongation)	Matière organique (compost, fiente)	Groupes méthyles et méthylènes (CH ₃ , CH ₂) de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques, urée, composés carbonylés	Groupements carbonyles (C=O) présents dans les acides humiques ou urée
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (fiente, MAP)	Bande due aux vibrations antisymétriques du nitrate
~1230-1240	C-N (élongation)	Amines (urée, fiente)	Groupes amines issus de la fiente ou urée
~1100-1000	P=O / P-O / S=O (symétrique ou asymétrique)	Phosphates (MAP), sulfates (K ₂ SO ₄)	Présence des groupes phosphates et sulfates caractéristiques
~870-900	P-O (élongation secondaire)	Phosphates (MAP)	Bande secondaire typique des phosphates minéraux

Engrais 03 : Formulation : Compost, Zéolite, Urée, MAP, K₂SO₄

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420–3300	O–H / N–H (élongation)	Eau liée, amines (urée), zéolite	Bande large liée à l'humidité, vibrations N–H des amines de l'urée
~2920	C–H (élongation)	Compost	Groupes méthyles/méthylènes du compost
~1680	C=O (élongation)	Urée	Bande caractéristique du groupement carbonyle (C=O)
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Trace possible nitrates	Présence faible possible de nitrates
~1240	C–N (élongation)	Urée	Vibration caractéristique des liaisons C–N dans l'urée
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	MAP (phosphates), K ₂ SO ₄ (sulfates)	Présence des vibrations des phosphates et sulfates
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 04 : Formulation : Compost, Fiente, Zéolite, MAP, K₂SO₄

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles, argiles (zéolite)	Bande large liée à l'humidité, groupes hydroxyles du compost et des argiles
~2920	C–H (élongation)	Compost, fiente	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles présents dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (fiente, MAP)	Bande caractéristique des vibrations antisymétriques du nitrate
~1230–1240	C–N (élongation)	Amines (fiente)	Groupes aminés issus de la fiente
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	Phosphates (MAP), sulfates (K ₂ SO ₄)	Vibration caractéristique des phosphates et sulfates
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 05 : Formulation : Compost, Zéolite, Urée, MAP, K₂SO₄, Bentonite

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles, argiles (bentonite)	Bande large liée à l'humidité, groupes hydroxyles des argiles et bio-organique
~2920	C–H (élongation)	Compost	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1680	C=O (élongation)	Urée	Bande caractéristique du groupement carbonyle (C=O) de l'urée
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Trace possible	Traces possibles de nitrates
~1240	C–N (élongation)	Urée	Groupes aminés caractéristiques de l'urée
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	MAP (phosphates), K ₂ SO ₄ (sulfates)	Présence des vibrations caractéristiques des phosphates et sulfates
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 06 : Formulation (Compost Fiente Zéolite NPK 15-15-15)

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles, argiles (zéolite)	Bande large liée à l'humidité et aux groupes hydroxyles
~2920	C–H (élongation)	Compost, fiente	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (présents dans NPK)	Vibration caractéristique des nitrates
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	Phosphates (NPK)	Présence des vibrations phosphates caractéristiques
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 07 : Formulation (Compost Fiente Zéolite NPK 15-15-15)

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles, argiles (zéolite)	Bande large liée à l'humidité et aux groupes hydroxyles
~2920	C–H (élongation)	Compost, fiente	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (présents dans NPK)	Vibration caractéristique des nitrates
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	Phosphates (NPK)	Présence des vibrations phosphates caractéristiques
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 08 : Formulation (Compost Fiente Zéolite Urée MAP K₂SO₄ Phosphate naturel)

Groupe ment fonctionnel	Type d'engrais	Bande(s) IR caractéristiques (cm⁻¹)	Type de vibration
NO₃⁻ (nitrate)	Nitrate d'ammonium, nitrate de potassium	~1380–1450 (forte, fine)	v ₃ antisymétrique N=O
NH₄⁺ (ammonium)	Sulfate/phosphate d'ammonium	~3030–3300 (large), ~1400–1500	v N–H, δ N–H
CO–NH₂ (urée)	Urée	~1680 (v C=O), ~3300 (v N–H), ~1600 (δ N–H)	amide I & II
PO₄³⁻ (phosphate)	Phosphate mono/dicalcique, MAP, DAP	~900–1100 (multiples bandes)	v P=O et v P–O
SO₄²⁻ (sulfate)	Sulfate d'ammonium ou de potassium	~1100–1200 (forte), parfois doublet	v S=O, v S–O
OH (acide, eau)	Acidephosphorique, humidité	~3200–3600 (large bande), ~1600	v O–H et δ H–O–H

Engrais 09 : Compost Biochar NPK 15-15-15

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles (biochar)	Bande large liée à l'humidité et groupes hydroxyles du biochar
~2920	C–H (élongation)	Compost, biochar	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (NPK)	Vibration caractéristique des nitrates
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	Phosphates, sulfates (NPK)	Présence des vibrations caractéristiques des phosphates et sulfates
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

- **Engrais 10** : formulation (Compost Fiente Zéolite NPK 15-15-15)

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles (zéolite)	Bande large liée à l'humidité et groupes hydroxyles
~2920	C–H (élongation)	Compost, fiente	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (NPK)	Vibration caractéristique des nitrates
~1100–1000	P=O / P–O / S=O	Phosphates, sulfates (NPK)	Présence des vibrations caractéristiques des phosphates et sulfates
~870–900	P–O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 11 : formulation (Compost Fiente Biochar NPK 15-15-15)

Nombre d'onde (cm⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O-H (élongation)	Eau, hydroxyles (biochar)	Bande large liée à l'humidité et groupes hydroxyles
~2920	C-H (élongation)	Compost, fiente, biochar	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Nitrates (NPK)	Vibration caractéristique des nitrates
~1100-1000	P=O / P-O / S=O	Phosphates, sulfates (NPK)	Présence des vibrations caractéristiques des phosphates et sulfates
~870-900	P-O (élongation secondaire)	Phosphates	Bande secondaire typique des phosphates

Engrais 12 : formulation (Compost Biochar)

Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Type de vibration	Groupe concerné	Interprétation selon la table IR simplifiée
~3420	O–H (élongation)	Eau, hydroxyles	Bande large liée à l'humidité et groupes hydroxyles
~2920	C–H (élongation)	Compost, fiente	Groupes méthyles/méthylènes de la matière organique
~1640	C=O (élongation)	Acides humiques	Groupements carbonyles dans la matière organique
~1385	NO ₃ ⁻ (asymétrique)	Traces possibles	Traces possibles de nitrates
~1230–1240	C–N (élongation)	Amines	Groupes aminés provenant de la fiente

Résumé

Ce travail a consisté à caractériser douze engrais organo-minéraux à base de matières organiques telles que le compost, la fiente et le biochar, associés à des intrants minéraux. Les analyses physico-chimiques ont permis de déterminer le pH, la conductivité électrique, l'humidité et la teneur en matière organique, mettant en évidence des formulations globalement conformes aux normes en vigueur. L'analyse par spectroscopie infrarouge a confirmé la présence de groupes fonctionnels en lien avec les composants utilisés. Les tests de phyto-toxicité réalisés sur les graines de cresson ont révélé une bonne compatibilité biologique de la majorité des échantillons, en particulier à faible concentration. L'ensemble des résultats obtenus met en évidence la qualité agronomique des engrais élaborés et la cohérence entre leur composition chimique et leurs effets biologiques.

Mots-clés : Engrais organo-minéraux, biochar, analyses physico-chimiques, spectroscopie IR, phytotoxicité

Abstract

This project focused on the characterization of twelve organo-mineral fertilizers based on organic materials such as compost, poultry manure, and biochar, combined with mineral inputs. Physico-chemical analyses were carried out to determine pH, electrical conductivity, moisture content, and organic matter content, revealing that most formulations comply with current standards. Infrared spectroscopy analysis confirmed the presence of functional groups consistent with the materials used. Phytotoxicity tests conducted on garden cress seeds showed good biological compatibility for most samples, especially at low concentrations. Overall, the results highlight the agronomic quality of the developed fertilizers and the consistency between their chemical composition and biological effects.

Keywords: Organo-mineral fertilizers, biochar, physico-chemical analyses, infrared spectroscopy, phytotoxicity