

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences Agronomiques



Mémoire

Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences agronomiques

Spécialité : Protection de la ressource Sol Eau et Environnement

Présenté par : - Melle CHERBI AICHA

- Melle LAMOURI KHADIDJA

Thème

**Etude de l'effet du biochar des boues
résiduaires sur la qualité physique du
sol sableux (région de Ouargla)**

Le : 23/06/2022

Devant le Jury :

M. KARABI MOKHTAR

M.C.A. Président

UKM Ouargla

Mme DERAOUI NAIMA

M.C.A. Examinatrice

UKM Ouargla

M. DADDI BOUHOUN MUSTAPHA

Pr.

Encadreur

UKM Ouargla

Melle LIMAM AMNA

Doctorant(e)

Co-Encadreur

UKM Ouargla

Année Universitaire : 2021 / 2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu Tout-Puissant pour le courage et la force

Qu'Il nous a donnés afin de mener ce travail, et pour les bonnes personnes qu'Il a mis sur notre chemin Nos vifs remerciements sont également adressés à notre encadreur DADDI BOUHOUN MUSTAPHA; Il a contribué par sa constante disponibilité et ses conseils à l'élaboration de ce mémoire. Nous avons appréciés ses qualités humaines, nous lui adressons tous nos respects.

Mes vifs remerciements et mes profondes gratitude s'adressent à co-encadreur LIMAM AMNA, pour suivi, sa patience, ses conseils.

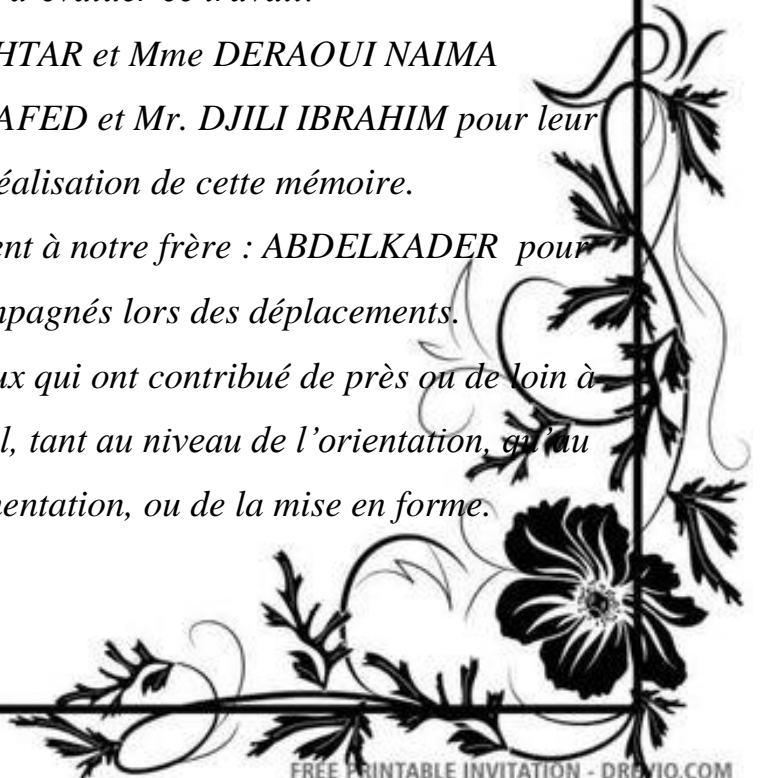
Nous tenons à remercier également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail:

Mr. KARABI MOKHTAR et Mme DERAOUI NAIMA

Mr. BELAROUCI M ELHAFED et Mr. DJILI IBRAHIM pour leur aide dans la réalisation de cette mémoire.

Nous remercions également à notre frère : ABDELKADER pour nous avoir accompagnés lors des déplacements.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, tant au niveau de l'orientation, qu'au niveau de la documentation, ou de la mise en forme.





DEDICACES

A mes parents pour leur patience, encouragement, soutien et surtout leur amour que Dieu les protège et les offrent une longue vie.

A mes chers frères : Adel et Moussa et Abou Baker, Cherbi.

A mes belles roses, mes chères sœurs : Samira et Fatima et Ouaad et Naima et Noussaiba et Naoual et Kaouther.

A mes neveux et à mon beau-frère Hanouni Amar (tout le respect). A mes amies : Meriem, Fatma, Nesrine, Fatima, Ouafa, Nafissa, Halima et Achouak.

A mes collègues de la 2ème année Master (Sol-Eau-Environnement) de la promotion 2021/2022.

A toute ma grande famille et à mon binôme et ma soeur Khadidja Lamouri

Je dédie ce modeste travail.

Aïcha.





Dédicace

A mes chers parents : Aucun mot, aucune dédicace ne peut compenser les sacrifices que vous avez fournis pour notre bien-être et notre confort.

A mes sœurs et frères : trouvez dans ce rapport tous les sentiments de fraternité qu'on porte pour vous.

A mes sœurs et frères : Boumadien ; Meriem Madani; Ahlem, Halima ; Nadjat ; Abd elaziz et Meriem la femme de mon oncle trouvez dans ce rapport tous les sentiments de fraternité qu'on porte pour vous

À mes amies : Meriem Merabet; Fatma Ghedamsi; Cherfaoui Houssam eddin; Amira Kobba et Mon Fiancé; Fatima Gouamid, Nesrine Choufaoui

Je n'oublie pas non plus la femme de mon oncle décédé, avec qui j'aurais aimé qu'elle partage cette joie, que Dieu lui fasse miséricorde

A toute ma grande famille et à mon binôme et ma sœur Aicha Cherbi

khadidja



Liste des figures

Figure N° 1: Situation géographique de la wilaya de Ouargla (GOOGLE, 2022)	5
Figure N° 2 : Diagramme ombrothermique appliqué à la région de Ouargla (2009 – 2018).....	7
Figure N° 3 : Synthèse d’approche méthodologique	21
Figure N° 4 : Situation et délimitation du site expérimental l’exploitation de l’université de Ouargla (Ex : I.T.A.S.) (image Google Earth, 2001)	22
Figure N° 5: Lit de séchage	23
Figure N° 6: Séchage dans l’étuve.....	24
Figure N° 7: Production de biochar (1 : Broyage des boues, 2 : Creusets + couvercles dans le four, 3 : Séchage de biochar, 4 : Biochar 500°C)	25
Figure N° 8: Schéma du dispositif expérimental adopté.....	26
Figure N° 9: Influence du taux d’application de biochar sur la Da initiale.....	35
Figure N° 10: Influence du type de biochar sur la Da initiale	36
Figure N° 11: Influence du taux d’application du biochar sur la Da finale.....	37
Figure N° 12: Influence du type de biochar sur la Da finale	38
Figure N° 13: Comparaison entre la Da initiale et Da finale.....	39
Figure N° 14: Influence du taux d’application de biochar sur la perméabilité.....	39
Figure N° 15: Influence du type de biochar sur la perméabilité.....	40

Liste des photographies

Photo N° 1 : Dunes de Ain El Beida	23
Photo N° 2: Dispositif expérimental dans la serre	27
Photo N° 3: Dispositif de perméabilité.....	30

Liste des tableaux

Tableau N° 1 : Données climatiques de la région de Ouargla de 2009 à 2018 (ONM Ouargla, 2019)	6
Tableau N° 2: Les traitements de l’expérience.....	27
Tableau N° 3 : Propriétés physique et chimiques du sol initial (avant expérimentation)	32
Tableau N° 4: Propriétés physico-chimiques de biochars B1 et B2.....	33

Liste des annexes

Annexe N° 1: Echelles d'interprétation de pHe (1 :2.5) (AUBERT, 1978).....	54
Annexe N° 2: Echelle de la salinité pour l'extrait (1/5) (AUBERT, 1978).	54
Annexe N° 3: L'interprétation de calcaire total CaCO ₃ (%) (BERNARD, 2000 in MENACER, 2009).....	54
Annexe N° 4: L'échelle de MO% (MORAND, 2001)	54
Annexe N° 5 : Les caractéristiques physiques des sols (après expérimentation)	55
Annexe N° 6: Statistiques descriptives de la densité apparente initial	55
Annexe N° 7: Analyse de variance sur la densité apparente initial	55
Annexe N° 8: Statistiques descriptives de perméabilité	55
Annexe N° 9: Analyse de variance sur la perméabilité	56
Annexe N° 10: Statistiques descriptives de la densité apparente finale	56
Annexe N° 11: Analyse de variance sur la densité apparente finale	56
Annexe N° 12 : Schéma préparation de mélange sol- biochar	56
Annexe N° 13 : : mesure CE de biochar	57
Annexe N° 14: mesure pH de biochar	57

Liste des abréviations

Abréviations	Signification
O.N.M.	Office National de Météorologie
A.N.R.H.	Agence Nationale des Ressources Hydriques
CE	Conductivité électrique
CEC	Capacité d'échange cationique
PVC	Polychlorure de vinyle
F.A.O.	Food and Agriculture Organisation (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
DEDICACES	II
Dédicace	III
Liste des figures	IV
Liste des photographies	IV
Liste des tableaux	IV
Liste des annexes	V
Liste des abréviations	V
Table des matières	VI
Introduction	2

Chapitre I. Présentation de la région d'étude

I.1. Situation et limites géographiques	5
I.2. Caractéristiques de la région d'étude	5
I.2.1. Caractéristiques climatiques	5
I.2.2. Synthèse climatique	7
I.2.3. Caractéristiques géologiques	8
I.2.4. Caractéristiques hydrologiques	8
I.2.5. Caractéristiques géomorphologiques	8
I.2.6. Caractéristiques pédologiques	9

Chapitre II. Généralités sur le biochar

II.1. Définition du biochar	11
II.2. Propriétés physiques et chimiques de biochar	11
II.2.1 Propriétés physiques	11
II.2.2 Propriétés chimiques	12
II.3. Effets du biochar sur les propriétés physiques et chimiques du sol	14
II.4. Types des biochars	14

Chapitre III. Les boues résiduaires

III.1. Définition des boues	16
III.2. Différents types des boues résiduaires	17
III.2.1. Boues urbaines	17
III.2.2. Boues industrielles	18
III.3. Composition des boues résiduaires	18

III.3.1. Eléments utiles	18
III.3.2. Eléments indésirables	19
Chapitre IV. Matériel et méthodes	
IV.1. Approche méthodologique.....	21
IV.2. Site expérimental.....	21
IV.3. Matériels d'étude.....	22
IV.4. Conditions de déroulement de l'essai.....	22
IV.4.1. Prélèvement du sol.....	22
IV.4.2. Prélèvement des boues	23
IV.4.3. Prétraitement des boues.....	24
IV.4.4. Production de biochar.....	24
IV.4.5. Confection des pots cylindriques	26
IV.5. Protocole expérimental	26
IV.5.1. Dispositif expérimental	26
IV.5.2. Conduite de l'expérimentation	27
IV.5.3. Paramètres étudiés.....	28
IV.6. Méthodes d'analyse utilisées	28
IV.6.1. Analyse du sol.....	28
IV.6.2 Analyse de biochar.....	30
IV.7. Analyse statistique.....	30
Chapitre V. Résultats et discussion	
V.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol sableux et du biochar	32
V.1.1. Caractéristiques du sol sableux	32
V.1.2. Caractéristiques du biochar.....	33
V.2. Effets du biochar sur les propriétés physiques du sol.....	34
V.2.1. Effet du biochar sur la densité apparente.....	34
V.2.2. Effet du biochar sur la perméabilité	39
Conclusion.....	43
Références bibliographiques	45
Annexes.....	53
Résumé.....	58

Introduction

Introduction

L'Algérie compte plus de 2 millions de km² de zones arides, ce qui représente environ les 4/5 de la superficie totale du pays (BOUTEBILA, 1973). Les sols y sont squelettiques et pauvres en éléments nutritifs indispensables à la vie des plantes, c'est à dire que leur fertilité naturelle est moindre, ce qui limite la mise en culture des terres si on ne manifeste aucun travail d'amélioration envers ces sols. Toutefois, cette amélioration doit porter sur la connaissance préalable des caractéristiques physico-chimiques de ces sols pour mieux cerner le déficit et le corriger ultérieurement (GONDE et al ; 1968). Ainsi, les matières organiques de toutes sources qu'elles soient semblent être les mieux appropriées pour l'amélioration des conditions physico-chimiques des sols pauvres (IDDER, BELLALOUÏ ; 1990). Dans ce cas, la recherche d'autres sources d'approvisionnement en matière organique reste nécessaire.

Parmi ces sources figure le biochar issu de la pyrolyse des boues des stations d'épuration domestiques, dont l'utilisation en agriculture peut contribuer à une solution à son élimination et apporter un bénéfice tangible au processus agricole.

La forte augmentation de la population mondiale, les exigences strictes pour le traitement des effluents d'eaux usées ainsi que l'augmentation de nombre de foyers raccordés aux égouts ont conduit à une augmentation du volume de boues d'épuration produites lors du processus de traitement des eaux usées. Les boues d'épuration sont un déchet difficile à gérer, non seulement en raison des quantités élevées produites, mais aussi en raison de sa forte concentration de métaux lourds et d'agents pathogènes. Une part des méthodes conventionnelles utilisées pour l'élimination des boues d'épuration (utilisation directe dans l'agriculture, l'incinération et la mise en décharge), ces derniers temps est un intérêt accru pour le traitement thermique de ces déchets. Bien qu'il existe diverses méthodes alternatives de traitement thermique, telles que le traitement thermique par micro-ondes (FRANCA et al ; 2010).

Le biochar, le produit solide de la pyrolyse de la biomasse, semble être un amendement de sol très prometteur. Au cours de la dernière décennie, le biochar est considéré comme un produit de valeur qui offre des possibilités d'amélioration des sols et de séquestration du carbone afin d'atténuer les changements climatiques (PEAKE et al ; 2014). Il a été démontré que l'amendement au biochar influence les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (MUKHERJEE et LAL, 2013, HERATH et al ; 2013, LEHMANN et al ; 2011). Cette caractéristique du biochar est principalement attribuée à ses caractéristiques physiques telles que sa structure hautement poreuse et sa grande superficie (ATKINSON et al ; 2010).

Selon MAHMOOD et *al* ; (2003), l'incorporation de biochar influence les propriétés basiques du sol telles que la densité apparente du sol, la texture et la distribution granulométrique. En ajoutant du biochar, la macroporosité du sol et la mésoporosité ont été significativement augmentées, ce qui a amélioré la disponibilité de l'aération et de l'eau pour les racines des plantes (HERATH et *al* ; 2013). Au contraire, dans leur expérience sur sol sableux, JEFFERY et *al* ; (2015) n'ont trouvé aucun effet significatif de l'application de biochar sur la rétention d'eau dans le sol. Des résultats similaires ont été observés par HARDIE et *al* ; (2014) sans amélioration de l'humidité du sol et des caractéristiques de rétention d'eau.

Ce travail a été réalisé dans le but de tester l'efficacité de l'utilisation de biochar des boues sur les propriétés physiques des sols sableux (région de Ouargla).

Cette étude a également pour objectif de connaître l'effet de la température de pyrolyse sur les propriétés du biochar.

Le travail de ce mémoire est scindé en trois parties. La première partie présente un aperçu bibliographique de la présentation de la région d'étude et des généralités sur le biochar et les boues résiduelles, alors que la seconde récapitule l'étude expérimentale de l'indication de préparation du biochar et des protocoles d'analyses utilisés. Les résultats des différentes analyses du biochar et des sols sont présentés dans la troisième partie, ainsi que leurs interprétations accompagnées d'une conclusion.

Chapitre I. Présentation de la région d'étude

Chapitre I. Présentation de la région d'étude

I.1. Situation et limites géographiques

Notre région d'étude est Ouargla. Elle s'étend sur une superficie de 163 238 km², elle est limitée au Nord-est par la wilaya d'El Oued, Nord-ouest par la wilaya de Djelfa, au Sud-est par la wilaya d'Illizi et à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa (Figure N° 1). Ses coordonnées géographiques sont: les longitudes 5°25' Est et les latitudes 31°55' et 32°00' (ROUVILLOIS-BRIGOL, 1975).

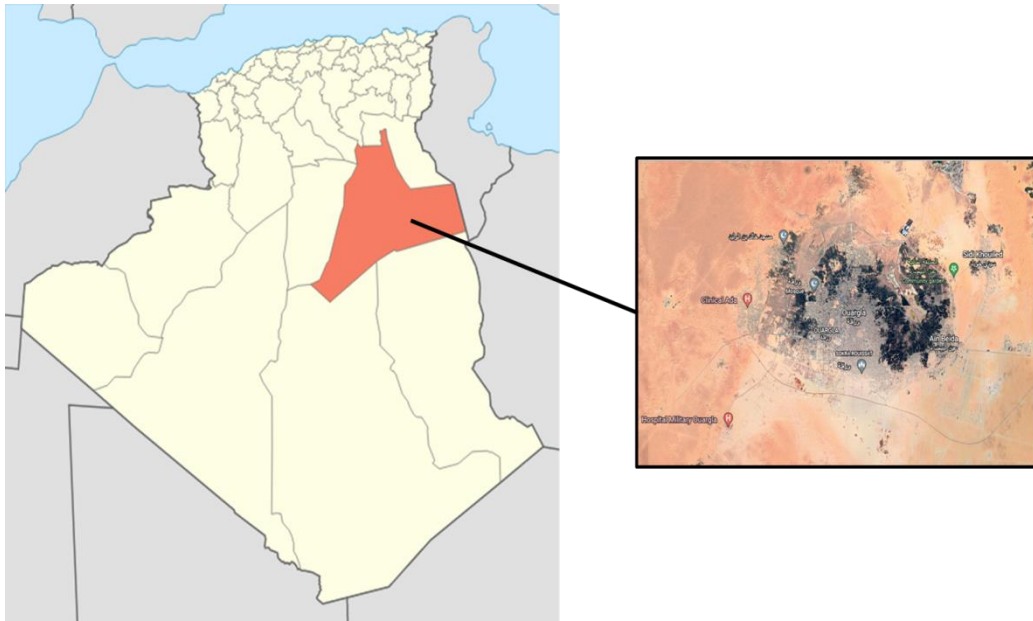


Figure N° 1: Situation géographique de la wilaya de Ouargla (GOOGLE, 2022)

I.2. Caractéristiques de la région d'étude

I.2.1. Caractéristiques climatiques

La région de Ouargla est caractérisée par un climat contrasté, caractérisé par des précipitations rares et irrégulières, des températures élevées, une luminosité intense ainsi qu'une forte évaporation due à la sécheresse de l'air (Tableau N° 1). L'amplitude thermique est importante entre le jour et la nuit et entre l'été et l'hiver (NAJI, 2015).

Tableau N° 1 : Données climatiques de la région de Ouargla de 2009 à 2018 (ONM Ouargla, 2019)

	Température (C°)			Humidité (%)	Vents (km/h)	Précipitation (mm)	Evaporation (mm)	Insolation (h/mois)
	T min	T max	T moy					
Janvier	5,23	19,52	12,37	55,33	8,17	7,95	97,85	248,38
Février	6,97	21,19	14,08	47,96	9,20	3,69	120,69	237,43
Mars	10,68	25,67	18,17	42,26	9,74	5,08	180,62	266,82
Avril	15,35	30,76	23,06	36,21	10,26	1,48	231,34	285,33
Mai	19,99	35,34	27,67	30,69	10,56	2,07	302,61	316,25
Juin	24,81	40,42	32,61	26,97	9,96	0,77	366,88	229,30
Juillet	28,14	44,04	36,09	22,94	8,92	0,35	447,18	317,54
Août	27,26	42,42	34,84	26,79	8,95	0,38	388,00	341,44
Septembre	23,54	38,14	30,84	35,68	9,14	4,85	266,76	268,06
Octobre	17,15	31,83	24,49	41,47	7,87	3,81	207,61	270,72
Novembre	10,45	24,59	17,52	51,21	7,26	2,76	124,50	248,21
Décembre	5,87	19,83	12,85	58,09	6,93	3,74	86,17	238,98
Moyenne	16,29	31,15	23,72	39,63	8,91	3,08	235,02	272,37
Cumul	/	/	/		/	36,92	2820,21	3268,46

I.2.1.1. Température

À Ouargla, les températures sont en moyenne très élevées, le mois le plus chaud est juillet avec une température moyenne de 36,09°C et le mois le plus froid est janvier avec 12,37°C. La température moyenne maximale annuelle est de 31,15°C et la température moyenne minimale annuelle attend 16,29°C (Tableau N° 1).

I.2.1.2. Précipitation

Les répartitions de Ouargla sont marquées par une période de sécheresse étalée sur toute l'année. Les précipitations moyennes annuelles sont de 3,08 mm/an, avec un cumul annuel de 36,92 mm. Janvier est le mois le plus pluvieux 7,95 mm, et Juillet est le plus sec 0,35 mm (Tableau N° 1).

I.2.1.3. Humidité relative

L'humidité relative de l'air est très faible avec une moyenne annuelle de 39,63 %. L'humidité relative varie entre 22,94 % au mois de juillet à 58,09 % au mois de décembre, qui se manifeste par une sécheresse atmosphérique pendant toute l'année (Tableau N° 1).

I.2.1.4. Evaporation

L'évaporation est très importante surtout pendant les mois chauds où on note un maximum de 447,18 mm au mois de juillet et un minimum de 86,17 mm au mois de décembre (Tableau N° 1).

I.2.1.5. Insolation

La wilaya de Ouargla est caractérisée par une forte insolation durant la journée où on

enregistre une moyenne de 272,37 h/mois, avec un maximum de 341,44 h au mois d'aout et un minimum de 229,6 h au mois de juin (Tableau N° 1).

I.2.1.6. Vents

En général, Ouargla est caractérisée par des vents fréquents qui soufflent durant toute l'année avec des vitesses qui varient d'un mois à l'autre. La vitesse moyenne est de 8,91 m/s, la direction des vents dominants est de Nord, Nord- est et Sud, Sud-est (Tableau N° 1).

I.2.2. Synthèse climatique

Nous avons utilisé pour le climat de la région d'étude, le diagramme ombrothermique (2009/ 2018).

Selon BAGNOULS et GAUSSEN (1953), un mois est considéré biologiquement sec, lorsque le cumul des précipitations(P) exprimé en mm est inférieur ou égal au double de la température (T) exprimée en °C. L'intersection de la courbe thermique avec la courbe ombrique détermine la durée de la période sèche. Cette dernière est une suite de mois secs.

Elle peut s'exprimer par $P \leq 2T$ (BAGNOULS et GAUSSEN, 1957). Sur la (Figure N° 2) caractérisant la région de Ouargla, on remarque que la courbe des précipitations est toujours inférieure à celle des températures. Ceci laisse apparaître une période sèche qui s'étale durant toute l'année.

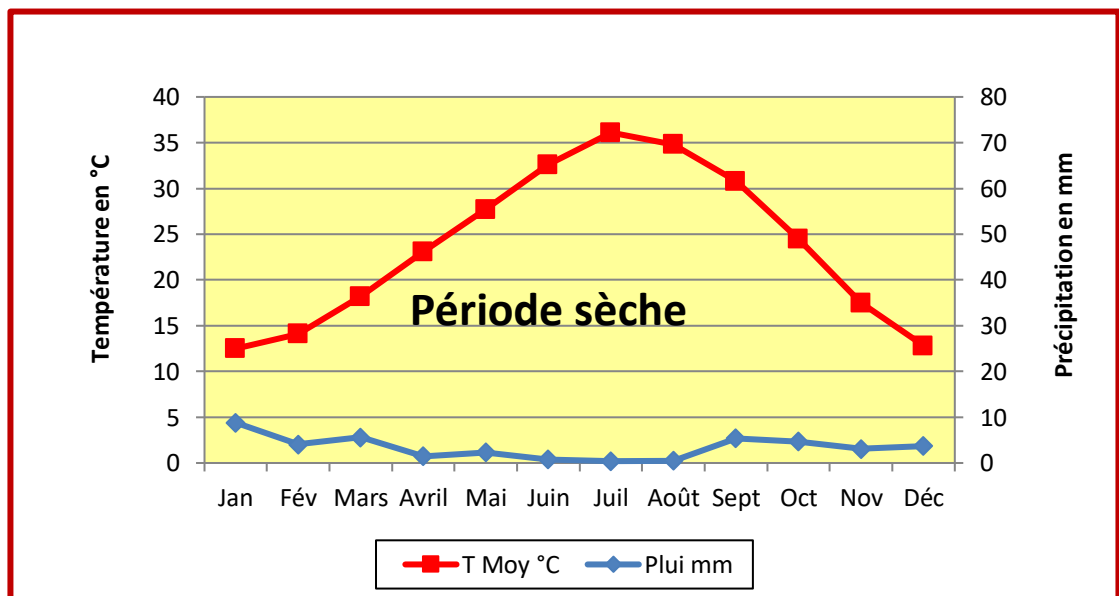


Figure N° 2 : Diagramme ombrothermique appliqué à la région de Ouargla (2009 – 2018)

I.2.3. Caractéristiques géologiques

D'après la carte géologique de l'Algérie au 1/500 000 réalisée en 1951 par les services géologiques (ZERGOUN, 1997), le relief de Ouargla est constitué des roches sédimentaires, alluvions et colluvions dérivés tels que les marnes jaunâtres plus ou moins gréseux, salées et gypseux, et des quantités importantes des sables récents du quaternaire. De plus l'existence des Calcaires jaunâtres ou ocre, avec les argiles sableuses rouges, salées et gypseuses et les grès, sables et conglomérats.

I.2.4. Caractéristiques hydrologiques

Les ressources en eau sont d'origine souterraine à Ouargla, comme dans la plupart des oasis sahariennes. Dans tout le Sahara septentrional, elles sont contenues dans les deux grands aquifères du Continental Intercalaire (CI) à la base et du Complexe Terminal (CT) au sommet. A ces deux réservoirs s'ajoute la nappe phréatique (GADDA, 2013).

Selon l'A.N.R.H. (2005), les prélèvements dans la nappe du CI, dans la wilaya de Ouargla, sont passés de 2,41 m³/s en 1989, à 4,41 m³/s en 1998, pour atteindre 4,51 m³/s en 2004. Selon la même source, les prélèvements dans la nappe du CT dans la wilaya de Ouargla, sont passé de 7,04 m³/s en 1989, à 9,32 m³/s en 1998 et ont atteint 11,98 m³/s en 2004 (GADDA, 2013).

I.2.5. Caractéristiques géomorphologiques

La zone d'étude est composée de plusieurs unités géomorphologiques à savoir principalement :

- **Hamada** : Sont des plateaux rocheux à topographie très monotone, souvent plate à perte de vue (MONOD, 1992). C'est une formation continentale détritique qui forme un plateau dont l'altitude moyenne est de 200 m (LAMINI, 2012). Ce plateau se localise dans la partie Ouest de la région d'étude.
- **Glacis** : Sur les versants qui limitent le plateau de hamada, les glacis s'étagent du plus ancien au plus récent, sur quatre niveaux de 200 à 140 m d'altitude. Ces glacis se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du Mio -Pliocène (HAMDI-AISSA, 2009).
- **Chotts et Sebkhass** : Les formations quaternaires occupent généralement les points bas des Grands bassins sédimentaires et forment des zones appelées en terme arabe "Sebkhass" et "Chotts". Une Sebkhass désigne un bas fond fermé et stérilisé par l'accumulation des sels, tandis qu'un Chott, est une zone plus étendue, entourant une

Sebkha. Ce sont donc des surfaces d'évaporation et d'exutoire dans lesquelles aboutissent des cours d'eau (NEZLI, 2004).

- **Dunes ou ergs** : Elles s'étendent sur toute la surface de la zone sous forme de voiles sableux de petits amas de sables pièges dans de petites touffes de végétation, mais particulièrement dans le secteur Est aux environs (MONOD, 1992).
- **Reg** : Ce sont des plaines de graviers et de fragments rocheux. Au Sahara, ils occupent des surfaces démesurées (MONOD, 1992).

I.2.6. Caractéristiques pédologiques

La région d'étude est caractérisée par des sols légers, à prédominance sableuse et à structure particulière. Elle est caractérisée également par un faible taux de matière organique, un pH alcalin, une faible activité biologique et une forte salinité (HALILAT, 1993).

Les sols de Ouargla dérivent du grès ; argile ; quartzeux du Mio-pliocène non gypseux. Ils sont constitués de sable quartzeux. Dans l'ensemble des sols, les squelettes sableux sont très abondants, constitué en quasi-totalité par du quartz. La couleur devient moins rouge et l'épaisseur de la pellicule diminue dans les sols en aval en particulier dans les dunes. Sur les sols de la dépression, la masse basale argileuse présente un aspect poussiéreux (HAMDI AISSA, 2001).

Chapitre II. Généralités sur le biochar

Chapitre II. Généralités sur le biochar

II.1. Définition du biochar

Le biochar est la partie solide produite par la pyrolyse, processus de dégradation d'une biomasse organique par la chaleur en absence d'oxygène. Il existe différents biochars, selon le matériel utilisé et la température de pyrolyse (BREWER et *al* ; 2011). Les biomasses organiques utilisées pour former le biochar sont d'origines végétales ou animales et riches en carbone comme le bois, les résidus de récoltes, les excréments d'animaux et les déchets organiques. Lors de la dégradation de la biomasse, trois phases sont générées par la pyrolyse. Il y a une partie solide (biochar), une partie liquide organique (bio-huile) et une partie gazeuse. La quantité de chaque composante (gaz, liquide et biochar) est différente selon la méthode de pyrolyse utilisée. Plusieurs systèmes de pyrolyse existent. Les systèmes les plus utilisés sont les pyrolyseurs rapides et lents (BREWER et *al* ; 2012, BRUUN et *al* ; 2012).

II.2. Propriétés physiques et chimiques de biochar

La matière première, la température, la vitesse d'élévation de la température, le temps de chauffage et la grosseur des particules peuvent affecter les propriétés physico-chimiques et la qualité d'un biochar (BREWER et *al* ; 2011, LEHMANN et JOSEPH, 2009, PITUELLO et *al* ; 2015). Parmi les propriétés physiques et chimiques qui distinguent un biochar, il y a la porosité, la surface spécifique, la capacité de rétention en eau, le contenu en éléments minéraux et organiques, la capacité d'échange cationique (CEC) et le pH.

II.2.1 Propriétés physiques

II.2.1.1 Porosité

Lors de la formation du biochar, la température de la pyrolyse choisie influence la porosité. DUTTA et *al* ; (2012) ont observé que les biochars produits entre 350°C et 400°C avaient une porosité totale plus élevée que ceux produits à 300°C. Aussi, BAGREEY et *al* ; (2001) ont démontré qu'une température de pyrolyse entre 400°C et 600°C a augmenté considérablement la porosité du biochar. L'augmentation des pores serait créée par un accroissement de molécules d'eau relâchées suite à l'action de l'hydroxylation à haute température (BAGREEY et *al* ; 2001). Aussi, le temps de séjour de la biomasse dans le pyrolyseur pourrait avoir un impact sur la porosité du biochar (NOVAK et *al* ; 2009a).

II.2.1.2 Surface spécifique

La surface spécifique d'un adsorbant est par définition une surface par unité de masse ($m^2 g^{-1}$), cette surface est créée essentiellement par les micro- et mésopores. Plus la surface

spécifique est grande plus la surface de contact est élevée et plus la quantité de matières adsorbées est importante. Ce paramètre est obtenu en appliquant la théorie de Brunauer, Emmet et Teller, d'où l'appellation surface BET (SCHIMMELPFENNIG et GLASER ; 2012). D'après la littérature, la surface spécifique des biochars varie beaucoup selon la température et les conditions de la pyrolyse. Il a été démontré qu'un biochar de paille de blé produit à partir d'une pyrolyse lente ($6^{\circ}\text{C min}^{-1}$, température finale à 525°C et maintenue durant 2 heures) a eu une plus faible surface spécifique ($0,6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) comparativement à la production de ce biochar à partir d'une pyrolyse rapide (250 à $1000^{\circ}\text{C s}^{-1}$, température finale à 525°C et maintenue durant quelques secondes, $1,6 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) (BRUUN et *al* ; 2012). NOVAK et *al* ; (2009a) ont déterminé que plus la température augmente, plus la surface spécifique s'élève et plus il y a une augmentation de la teneur en cendres.

II.2.1.3 Capacité de rétention en eau

Le rapport O:C d'un biochar serait un indicateur potentiel pour déterminer son caractère hydrophile et sa polarité. Normalement, lorsque la température de la pyrolyse augmente, le biochar a une faible teneur en oxygène et donc un rapport O:C très faible. Selon une étude de WANG et *al* ; (2006), l'augmentation de la température de la pyrolyse peut diminuer la polarité sur la surface du biochar résultant en une diminution de sa capacité de rétention en eau. Cependant, KINNEY et *al* ; (2012) ont observé une faible hydrophobicité de trois différents biochars pyrolysés entre 400°C à 600°C .

II.2.2 Propriétés chimiques

II.2.2.1. Composition minérale

Selon la littérature, la composition et la disponibilité des éléments minéraux des biochars varient beaucoup. La matière première et les conditions de la pyrolyse seraient la source de cette variation (DING et *al* ; 2016). CHAN et XU (2009) ont observé une grande variation du contenu en phosphore selon la biomasse et les conditions de la pyrolyse utilisées. Pour ce qui est du contenu en azote, celui-ci tend à être plus faible dans le biochar lorsque la température de pyrolyse augmente. De plus, il a été rapporté que lorsque la température de pyrolyse atteint 500°C , plus de la moitié du contenu en azote et en soufre de la biomasse peut être perdu (BAGREEY et *al* ; 2001, CHAN et XU, 2009, LANG et *al* ; 2005). La réduction de l'azote pourrait être causée par une perte de composés organiques volatiles lors de la pyrolyse. L'augmentation de la température de pyrolyse peut favoriser la libération plus de matières volatiles piégées dans le biochar (BAGREEY et *al* ; 2001 ; DUTTA et *al* ; 2012).

II.2.2.2. Capacité d'échange cationique

Il a été établi que plus la température de la pyrolyse est faible plus la CEC est faible et vice versa (LEHMANN, 2007). De plus, l'amendement avec un biochar possédant une surface spécifique élevée peut favoriser davantage la CEC des sols (LIANG et al ; 2006). La CEC du biochar est attribuée en partie à une augmentation de l'oxygénation des groupements fonctionnels retrouvés sur la surface du biochar (CHENG et al ; 2006). Ces groupes peuvent agir sur l'agrégation des particules du sol, sur la matière organique dissoute et sur le transport des gaz et de l'eau (JOSEPH et al ; 2009). Selon certains chercheurs, l'oxydation de la surface du biochar mènerait à une plus grande CEC par unité de carbone dans le sol (LIANG et al ; 2006, MAO et al ; 2012). Toutefois, l'ajout de biochar peut aussi avoir un effet nul sur la CEC du sol et cela pourrait dépendre du type de biomasse utilisée. Par exemple, NOVAK et al. (2009b) rapportent que l'amendement avec un biochar de coquilles de noix de pécan pyrolysé à 700°C n'a eu aucun effet sur la CEC d'un sol incubé pendant 67 jours.

II.2.2.3. pH et conductivité électrique

La température de la pyrolyse peut influencer le pH du biochar. Par exemple, NOVAK et al. (2009a) ont observé qu'un biochar produit à une température élevée (700°C) avait un pH plus élevé comparativement à un biochar produit à faible température (250°C). Une autre étude rapporte une augmentation de 2 unités de pH entre les biochars produits à une température de 300°C et de 600°C (RAJKOVICH et al ; 2012). L'augmentation de la température de pyrolyse peut favoriser la production de cendre et une augmentation du contenu en cations basiques (Na⁺, K⁺, Mg²⁺ et Ca²⁺) qui sont directement corrélés avec le pH du biochar (SINGH et al ; 2015). La matière première choisie peut également faire varier le pH du biochar, allant d'un pH = 4 à un pH = 12 (CHENG et al ; 2006, LEHMANN, 2007, ROGOVSKA et al ; 2012).

Par rapport à la conductivité électrique (CE), celle-ci semble varier plus en fonction du type de biomasse que de la température de la pyrolyse (RAJKOVICH et al ; 2012). Par exemple, la CE dans des biochars d'origine animale (bovin et volaille) et de maïs présentée dans l'étude de RAJKOVICH et al ; (2012) n'a pas été influencée avec l'augmentation de la température de la pyrolyse, allant de 300 à 600 °C. En excluant les résidus alimentaires et ceux des boues de papetières, la CE des biochars dans l'étude de RAJKOVICH et al ; (2012) est généralement plus élevée dans les biochars d'origine animale (200 à 500 mS m⁻¹) que ceux d'origine végétale (3,8 à 203 mS m⁻¹). SING et al ; (2015) mentionnent que le contenu en sels du matériel original influence la CE du biochar.

II.3. Effets du biochar sur les propriétés physiques et chimiques du sol

Selon la littérature, l'amendement en biochar peut améliorer les propriétés physiques du sol, telles que la masse volumique apparente, la porosité, la capacité de rétention en eau, la stabilité et la formation d'agrégats (DING et al ; 2016). Toutefois, des effets divergents ont été rapportés. Par exemple, WATTS et al ; (2005) n'ont observé aucune amélioration de l'agrégation de leur sol argileux amendé en biochar, sans apport supplémentaire en matière organique. Selon WARNOCK et al ; (2007), il est possible que l'agrégation soit seulement possible lorsqu'il y a une interaction entre la matière organique et l'activité des microorganismes. D'autre part, CHENG et al ; (2006) mentionnent que l'effet du biochar sur l'agrégation du sol serait plutôt lié à sa CEC et au pH du sol. Comme c'est le cas avec les argiles, une CEC élevée peut favoriser l'agrégation du sol.

Pour ce qui est des propriétés chimiques, une méta-analyse de 371 études indépendantes rapporte que l'ajout de biochar dans le sol permet d'augmenter le contenu en azote, phosphore, potassium et celui du carbone total (BIEDERMAN et HARPOLE, 2013, MUKHRJEE et al ; 2014). De plus, l'apport en biochar dans un sol acide tend à augmenter le pH, la CE et la CEC (CHINTALA et al ; 2014, NEMATİ et al ; 2014). Le potentiel chaulant du biochar peut être attribué à son haut contenu en cations basiques qui peut améliorer la disponibilité des nutriments essentiels à la plante dans un sol acide. Toutefois, cela va dépendre de la dose appliquée et de la composition chimique du biochar (CHINTALA et al ; 2014).

II.4. Types des biochars

Le type de biochar dépend de la température de pyrolyse et de la matière première. La température pyrolytique et la matière première ont divers effets sur le type et la composition du biochar. Les types de biochar peuvent être grossièrement classés en biochar de bois, biochar de paille, biochar de coquille, biochar de bambou, biochar de fumier, biochar de boue, et autres types de biochar. Ce dernier fait l'objet de notre étude.

Chapitre III. Les boues résiduaires

Chapitre III. Les boues résiduaires

III.1. Définition des boues

Les boues, appelées aussi bio-solides, sont définies comme étant un mélange d'eau et de matières solides, séparées par des procédés naturels ou artificiels de divers types d'eau qui le contiennent. Elles résultent du traitement des eaux usées dans des stations d'épuration urbaines, des fosses septiques domestiques, commerciales ou urbaines, des stations d'épuration industrielles, des usines de filtration ou de traitement de l'eau potable. Les eaux usées sont collectées puis acheminées vers les stations d'épuration ou elles sont traitées. En fin de traitement, à la sortie de la station, l'eau épurée est rejetée vers le milieu naturel et il reste des sous-produits désignés sous le terme de boues résiduaires (WERTHER et OGADA, 1999). Ces boues représentent avant tout une matière première composée d'eau, de différents éléments composés de matière organique, d'éléments fertilisants (N, P, K...), d'éléments traces métalliques (ETM), d'éléments traces organiques (ETO) et d'agents pathogènes (BOUSSELHAJ, 1996).

Les boues résiduaires peuvent être considérées comme des substances extraites à partir des eaux usées afin de pouvoir récupérer dans le milieu naturel une eau épurée (ANRED, 1982). Le traitement primaire de décantation des eaux prétraitées sous l'influence de la pesanteur forme les boues primaires (ZECAD, 1982). Au cours du traitement biologique, les particules dissoutes sont fixées et métabolisées par les micro-organismes (bactéries) en présence d'oxygène, cette biomasse bactérienne est séparée par une décantation pour donner les boues secondaires, les deux types de boues issues de ce procédé sont mélangés pour donner les boues mixtes. Les boues issues d'une épuration physico-chimique sont dites boues de coagulation (ANRED, 1982), celles-ci sont riches en résidus formés de réactifs chimiques (SBIH, 1990).

L'épuration des eaux usées produit des boues résiduaires. Les caractéristiques de ces boues dépendent du type de traitement des eaux usées (physico-chimique ou biologique), du procédé de stabilisation des boues (aérobie ou anaérobie, chaulage, compostage), et de leur état physique (variant d'un état liquide jusqu'au sec) (O.T.V, 1997 ; CULOT, 2005 ; GIRARD *et al* ; 2005).

III.2. Différents types des boues résiduaires

La production des boues résiduaires à partir de l'épuration des eaux usées passe par plusieurs étapes : le prétraitement de l'eau usée, son traitement primaire (décantation primaire) et son traitement secondaire (décantation secondaire).

On obtient des boues à caractéristiques différentes :

- **Les boues issues d'un traitement primaire** : elles sont produites par une simple décantation des Matières En Suspension (MES) contenues dans les eaux usées ; 70 % des MES peuvent ainsi être retenues. Avec l'évolution de la conception des stations, ce type de boues est en train de diminuer.
- **Les boues issues d'un traitement physico-chimique** : variante du type précédent, les matières organiques particulaires ou colloïdales contenues dans les eaux usées sont agglomérées par addition d'un réactif coagulant (sels de fer ou d'aluminium) ; 90 % des MES peuvent ainsi être captées. Séparées par décantation, les boues obtenues renferment une partie importante de sels minéraux issus des eaux brutes et de l'agent coagulant.
- **Les boues d'un traitement biologique** : ces boues sont essentiellement formées par les résidus de bactéries « cultivées » dans les ouvrages d'épuration. Ces bactéries se sont nourries des matières organiques contenues dans les eaux usées et les ont digérées. Pour maintenir l'activité biologique de la station à un bon niveau, une partie de la masse des bactéries ou « biomasse en excès » doit être soutirée régulièrement, entretenant ainsi la dynamique de reproduction bactérienne.

Généralement il existe deux grandes catégories de boues résiduaires qui sont les boues urbaines et les boues industrielles.

III.2.1. Boues urbaines

Elles résultent du traitement des eaux usées d'origine domestique. Pour être réputé « urbain », un effluent doit répondre aux caractéristiques suivantes :

Rapport $DCO/DBO_5 < 2.7$ (DCO : demande chimique en oxygène, DBO_5 : demande biologique en oxygène sur cinq jours) $DCO < 750 \text{mg/l}$. $NTK < 100 \text{mg/l}$. (NTK : azote total Kjeldhal). Ces données sont déterminées sur un échantillon moyen prélevé sur 24 heures, après une décantation de deux heures.

Les principaux types de boues proposés au recyclage en agriculture sont les boues liquides issues de traitements aérobies, les boues pâteuses issues de traitements aérobies ou anaérobies, les boues chaulées, les boues compostées, les boues physico-chimiques, les boues de lits de séchage et les boues de lagunage.

III.2.2. Boues industrielles

Elles résultent du traitement des eaux usées issues des industries. Leurs caractéristiques sont liées à la nature des activités industrielles concernées.

Généralement, les industries agro-alimentaires produisent des boues organiques facilement valorisables, tandis que d'autres boues industrielles sont essentiellement minérales et comportent parfois certains éléments traces métalliques ou organiques.

III.3. Composition des boues résiduelles

La composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées, de la période de l'année, et du type de traitement et de conditionnement pratiqué dans la station d'épuration (O.T.V, 1997).

En général, les boues se composent de trois éléments : les éléments utiles (matière organique, éléments fertilisants), les éléments indésirables (éléments traces métalliques, composés traces organiques), et les micro-organismes pathogènes :

III.3.1. Eléments utiles

III.3.1.1. Matière organique

Les boues contiennent généralement autant de matière organique qu'un fumier. Leur concentration en matière organique peut varier de 30 à 80%. Celle-ci est constituée de matières particulaires éliminées par gravité dans les boues primaires, des lipides (6 à 19 % de la matière organique), des polysaccharides, des protéines et des acides aminés (jusqu'à 33 % de la matière organique) ainsi que des produits de métabolisation et des corps microbiens résultant des traitements biologiques (digestion, stabilisation) (ADEME, 2001 ; AMIR, 2005).

III.3.1.2. Eléments minéraux

D'une manière générale, les boues contiennent des quantités appréciables en éléments nutritifs. Selon la dose appliquée, les boues peuvent couvrir, en partie ou en totalité les besoins des cultures en éléments nutritifs (azote, phosphore, magnésium, calcium et soufre), elles peuvent aussi corriger les carences à l'exception de celles en potassium (ZEBARTH et al ; 2000). Ce sont donc ces éléments qui déterminent la qualité agronomique des boues.

III.3.2. Eléments indésirables

III.3.2.1. Eléments traces métalliques (ETM)

Selon BAIZE et *al* ; (2006), les ETM sont des constituants indésirables des boues résiduaire. Leur présence génère une inquiétude lorsqu'il est question d'épandre ces boues sur des sols destinés à produire des aliments pour l'homme et/ou les animaux.

Selon TERCE (2001), les boues concentrent entre 70 et 90 % des quantités d'ETM des eaux usées entrantes dans la station d'épuration, L'essentiel de ces éléments vient des rejets industriels et dans une moindre mesure des rejets domestiques (utilisation de solvants, détergents, peinture, ...). Les épandages des boues industrielles apportent des quantités non négligeables d'ETM aux sols. Bien que, certains sont des oligo-éléments (Zinc, Cuivre, Fer), indispensables à faibles doses aux plantes, ils peuvent devenir toxiques s'ils dépassent un certain seuil. D'autres, comme le cadmium, le plomb, et le mercure sont toxiques même à faibles doses (BENTERROUCHE, 2007).

III.3.2.2. Composés traces organiques (CTO)

Dans les boues, une multitude de polluants organiques (hydrocarbures polycycliques aromatiques, polychlorobiphényles, phtalates etc..) peut se trouver en faible concentration (de l'ordre de ug/ Kg de MS) (PEREZ et *al* ; 2001 cité par AMIR, 2005). Ces CTO se dégradent dans le sol à des vitesses variables et n'ont pas donc un effet cumulatif. Néanmoins, au même titre que les ETM, les CTO peuvent, à forte dose, devenir toxiques pour les micro-organismes responsables de la fertilité des sols (BENTERROUCHE, 2007).

III.3.2.3. Micro-organismes pathogènes

Les boues résiduaire contiennent des milliards de micro-organismes vivants qui jouent un rôle essentiel dans le processus d'épuration. Seule une infime partie est pathogène (virus, bactéries, protozoaires, champignons, helminthes) et elle provient en majorité des excréments humains ou animaux (SAHLSTROM et *al* ; 2004). Pour la majorité des pathogènes, la durée de vie est limitée dans le sol. En revanche, les éléments parasitaires présentent une résistance plus élevée dans ces milieux. Pour cela, les boues doivent subir un prétraitement avant leur utilisation en agriculture (GARREC et *al* ; 2003).

Chapitre IV. Matériel et méthodes

Chapitre IV. Matériel et méthodes

IV.1. Approche méthodologique

Notre approche méthodologique consiste à étudier l'influence de deux types de biochar des boues résiduelles et leurs taux d'application sur les propriétés physiques du sol sableux dans la région de Ouargla. Elle est résumée dans la figure suivante :

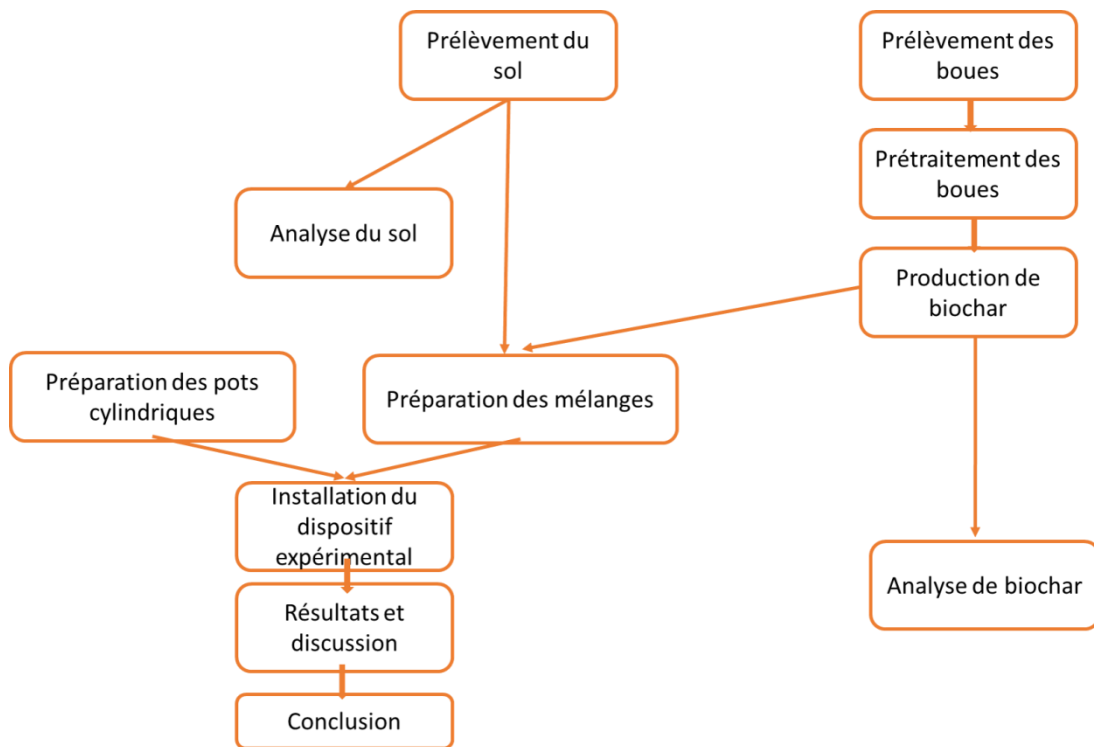


Figure N° 3 : Synthèse d'approche méthodologique

IV.2. Site expérimental

Les travaux d'expérimentation ont été réalisés dans la serre semi-contrôlée de l'exploitation agricole de l'université de Ouargla (ex. I.T.A.S.), située au sud-ouest de la ville de Ouargla, à six kilomètres environ du centre-ville (31°,57'Nord, 5° 20 Est, 134 m d'altitude)(image Google Earth, 2001).Elle a été créée en 1959 et occupe une superficie totale estimée de 16 hectares, dont 8 hectares sont aménagés et répartis en deux secteurs à savoir : secteur A, secteur C.



Figure N° 4 : Situation et délimitation du site expérimental l'exploitation de l'université de Ouargla (Ex : I.T.A.S.) (image Google Earth, 2001)

IV.3. Matériels d'étude

-Sol : le sol utilisé dans cet essai est un sol sableux provenant des dunes de Ain El Beida.

-Pots cylindriques : des cylindres en PVC (un diamètre de 10 cm, une hauteur de 20 cm) d'une capacité de 1 Kg sont utilisés.

-Biochar : Nous avons testé, comme amendement au sol, deux types de biochar à base des boues résiduelles pyrolysées à deux températures (300 et 500°C).

IV.4. Conditions de déroulement de l'essai

IV.4.1. Prélèvement du sol

Le sol est prélevé à l'aide d'une pelle dans la zone de Ain El Beida (31°,58'Nord, 5° 24 Est, 11 m d'altitude) (Photo N° 1) auprès des dunes. D'après HAMDI-AISSA (2001), les dunes sont des accumulations éoliennes de sables à grains fins issus probablement des sables rouges moi-pliocènes.

Après le prélèvement, le sol collecté est séché à l'air libre pendant 3 jours et tamisé à 2mm.



Photo N° 1 : Dunes de Ain El Beida

IV.4.2. Prélèvement des boues

Les boues résiduelles sont acquises (environ 10 Kg) auprès de la station d'épuration des eaux usées (STEP) de Touggourt au niveau des lits de séchage (Figure N° 5), à l'aide d'une pelle. Il s'agit d'une station de traitement par boues activées.



Figure N° 5: Lit de séchage

IV.4.3. Prétraitement des boues

Les boues collectées de la STEP de Touggourt sont séchées à l'air libre à température ambiante pendant 5 jours. Puis, elles sont séchées à 105°C pendant 24 heures à l'étuve. Ensuite, elles sont broyées dans un broyeur à couteaux pour passer un tamis de 1 mm (Figure N° 6).



Figure N° 6: Séchage dans l'étuve

IV.4.4. Production de biochar

Les boues broyées et tamisées sont placées dans des creusets de porcelaine recouverts de couvercles appropriés, et pyrolysées dans des conditions limitées en oxygène dans un four à moufle. La pyrolyse est réalisée à des températures de 300 et 500°C, puis maintenue aux températures données pendant 1 heure (Figure N° 7).

Le temps de séjour et la température de pyrolyse sont fixés selon l'étude de WANG et al. (2018).

Une fois le processus de pyrolyse terminé, le biochar est retiré du four et refroidi à la température ambiante.

Les échantillons de biochar sont ensuite pesés et stockés dans des boîtes en plastique scellées jusqu'à l'analyse et l'incubation dans le sol.



(1)



(2)



(3)



(4)

Figure N° 7: Production de biochar (1 : Broyage des boues, 2 : Creusets + couvercles dans le four, 3 : Séchage de biochar, 4 : Biochar 500°C)

IV.4.5. Confection des pots cylindriques

L'expérience d'incubation au biochar est réalisée dans des pots qui sont des cylindres en PVC (diamètre de 10 et une hauteur de 15cm) d'une capacité de 1kg. Les fonds des pots sont fermés à l'aide d'une fine moustiquaire pour soutenir le sol et permettre l'aération.

IV.5. Protocole expérimental

L'expérimentation consiste à un essai d'incubation du biochar dans le sol pendant deux mois (60 jours) et évaluer son influence sur quelques paramètres physiques du sol. L'essai a été installé le 10/03/2022, et s'est terminé le 10/05/2022.

IV.5.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental adopté est en blocs aléatoires complets à deux critères de classification (types de biochar–taux d'application) et trois répétitions pour chaque traitement. Le dispositif expérimental renferme trois blocs dans lesquels les 7 traitements sont répétés, ce qui donne un nombre total de 21 échantillons (Figure N°8 et Photo N° 2).

T0	T6	T4
T1	T0	T5
T2	T1	T6
T3	T2	T0
T4	T3	T1
T5	T4	T2
T6	T5	T3

Figure N° 8: Schéma du dispositif expérimental adopté

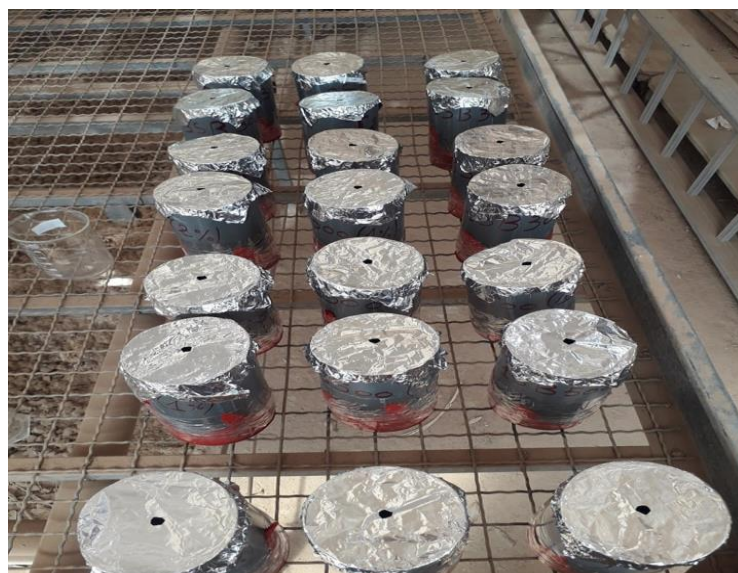


Photo N° 2: Dispositif expérimental dans la serre

IV.5.2. Conduite de l'expérimentation

Des mélanges de biochar et de sol sont préparés avec les taux de biochar suivants (qui égalisent la masse de biochar en pourcentage de la masse totale de l'échantillon) : 1% de biochar, 2% de biochar et 5% de biochar. Le traitement témoin sans ajout de biochar est également testé (Tableau N° 2).

Tableau N° 2: Les traitements de l'expérience

Traitement	Signification du traitement	Taux d'application de biochar (%)	Quantité de biochar (g)	Quantité du sol (g)	Total de l'échantillon (g)
T0	Témoin	0	0	1000	1000
T1	Sol + biochar de 300°C	1	10	990	1000
T2	Sol + biochar de 300°C	2	20	980	1000
T3	Sol + biochar de 300°C	5	50	950	1000
T4	Sol + biochar de 500°C	1	10	990	1000
T5	Sol + biochar de 500°C	2	20	980	1000
T6	Sol + biochar de 500°C	5	50	950	1000

Le sol est mélangé à la main avec du biochar pour obtenir les traitements. Les mélanges et le témoin sont emballés dans les pots cylindriques.

En utilisant de l'eau déminéralisée, l'humidité est maintenue à 60% de la teneur en eau du sol sur une base de poids sec en pesant et en ajoutant de l'eau aux pots 3 fois/semaine.

Les pots sont recouverts par papier aluminium troué au centre afin de maintenir l'humidité et de minimiser ainsi l'évaporation de l'eau des sols tout en permettant la circulation de l'air.

IV.5.3. Paramètres étudiés

En Mai 2022, les échantillons de sol sont prélevés pour la détermination de la perméabilité du sol et des mesures de la distance entre le sommet de la surface du sol et le sommet de la colonne a été mesurée pour estimer le volume d'espace libre de chaque colonne, puis le volume de sol a été déterminé par différence par rapport au volume total de la colonne pour déterminer la densité apparente.

IV.6. Méthodes d'analyse utilisées

IV.6.1. Analyse du sol

- **Granulométrie** : la détermination de différentes fractions granulométriques du sol est réalisée par la méthode de tamisage pour déterminer les proportions physiques de trois particules primaires du sol (sable grossière, sable fin, et limon+ argile).
- **Potentiel d'hydrogène** : la mesure du pH a été réalisée par la méthode électrométrique à l'aide d'un pH mètre à électrode de verre sur une suspension de terre fine avec un rapport sol/eau 1/2,5.
- **Conductivité électrique** : la conductivité électrique exprimée en (dS/m) a été mesurée à l'aide d'un conductimètre et sel on un rapport (sol/eau = 1/5) (AUBERT, 1978).
- **Calcaire total** : le calcaire total est dosé par la méthode gazométrique en utilisant le calcimètre de Bernard; la méthode consiste à décomposer les bicarbonates du sol par l'acide chlorhydrique (6N) et à mesurer le volume de gaz carbonique (CO₂) dégagé.
- **Densité apparente** : La distance entre le sommet de la surface du sol et le sommet de la colonne a été mesurée pour estimer le volume d'espace libre de chaque colonne, puis le volume de sol a été déterminé par différence par rapport au volume total de la colonne. La densité apparente a été calculée en divisant la masse de sol initialement sèche au four par le volume de sol. Cette approche ne suppose aucune modification de la masse de sol pendant l'incubation et la valeur obtenue correspond à la densité apparente moyenne de la colonne (BASSO et al ; 2013).
- **Perméabilité** : Le test de perméabilité à hauteur de chute implique un écoulement d'eau à travers un échantillon de sol relativement court relié à une colonne montante qui fournit la

hauteur d'eau et permet également de mesurer le volume d'eau traversant l'échantillon. Le diamètre de la colonne montante dépend de la perméabilité du sol testé. Le test peut être réalisé dans une cellule de perméabilité Falling Head ou dans une cellule oedométrique.

Avant de commencer les mesures de débit, l'échantillon de sol est saturé et les bornes-fontaines sont remplies d'eau désaérée jusqu'à un niveau donné. Le test commence alors en laissant l'eau s'écouler à travers l'échantillon jusqu'à ce que l'eau dans la colonne montante atteigne une limite inférieure donnée. Le temps nécessaire à l'eau de la colonne montante pour descendre du niveau supérieur au niveau inférieur est enregistré. Souvent, la colonne montante est remplie et le test est répété plusieurs fois. Le temps enregistré doit être le même pour chaque test avec une variation admissible d'environ 10% (HEAD ,1982) sinon le test échoue.

❖ Méthode de la tête tombante

Cette méthode, également appelée test de perméabilité à charge variable, convient aux sols à grains fins à perméabilité intermédiaire à faible tels que les argiles et les limons.

Sur la base des résultats du test, la perméabilité de l'échantillon peut être calculée comme :

$$K = 2.3 \frac{a.L}{A.T} \log_{10} \frac{H_0}{H_1}$$

K : coefficient de perméabilité (mm/s)

A : surface du cylindre (mm²).

H₀ : niveau initial de la hauteur d'eau dans le cylindre (mm).

H₁ : niveau final de la hauteur d'eau dans le cylindre (mm).

L : longueur du tube vertical (mm).

a : surface du tube vertical (mm²).

T : Temps mis pour atteindre le niveau d'eau de H₀ à H₁ (s).



Photo N° 3: Dispositif de perméabilité

IV.6.2 Analyse de biochar

-Le rendement : a été déterminé comme le rapport du poids du biochar produit au poids sec des boues d'épuration soumises à la pyrolyse :

$$\text{Rendement de biochar (\%)} = (P2/P1) \times 100$$

où P1 est le poids sec de l'échantillon de boues d'épuration avant la pyrolyse et P2 est le poids du biochar (AGRAFIOTI et *al* ; 2013).

-Matière organique : a été déterminée après incinération de l'échantillon de biochar dans un four à moufle à 750°C pendant 6 heures (ENDERS et LEHMANN, 2017).

-pH et CE : en utilisant un pH-mètre et conductimètre, le pH et la CE de chaque biochar ont été mesurés en triple en utilisant un mélange biochar : eau distillée à 1/10 après avoir agité pendant 30 minutes (SINGH et *al* ; 2017).

IV.7. Analyse statistique

Les données de perméabilité et la densité apparente sont traitées par le logiciel statistique Excel Stat version 2009/6/01. Après codage et discrétisation nous avons réalisé une analyse ANOVA. Nous avons procédé à une analyse de variance à deux facteurs, types et taux d'application de biochar. Nous avons retenues les seuils de signification suivants :

- Très hautement significative à $\alpha = 0,001$
- Hautement significative à $\alpha = 0,01$
- Significative à $\alpha = 0,05$

Le test de Fisher est le test qu'on a utilisé pour la comparaison entre les moyennes.

Chapitre V. Résultats et discussion

Chapitre V. Résultats et discussion

V.1. Caractéristiques physico-chimiques du sol sableux et du biochar

V.1.1. Caractéristiques du sol sableux

Le tableau N° 3 présente les résultats des analyses initiales du sol étudié. Le sol de notre expérimentation est caractérisé par une texture sableuse.

Tableau N° 3 : Propriétés physique et chimiques du sol initial (avant expérimentation)

Paramètres	Résultats		Unités
Granulométrie	Sable moyen	9.9	%
	Sable fin	17.4	
	Sable très fin	68	
	Limon + Argile	2.7	
La conductivité électrique (CE)	1.83		à 25 °C (1/5) (dS/m)
pH (1/2.5)	6.96		/
CaCO ₃	0.82		%

- ❖ La conductivité électrique (CE) indique la capacité à transporter l'électricité, elle dépend de sels contenus dans le sol. La conductivité électrique exprimée en (dS/m) a été mesurée à l'aide d'un conductimètre et selon un rapport (sol/eau =1/5) (AUBERT, 1978). La CE de sol est 1.83dS/m c'est-à-dire le sol est peu salé selon la classification d'AUBERT(1978) (Annexe N° 2).
- ❖ La mesure du pH (potentiel hydrogène) du sol permet de déterminer son acidité ou son alcalinité (ou état acido-basique) pour le sol à étudier. Le pH du sol est de 6.96 c'est-à-dire le sol est très légèrement acide selon la classification d'AUBERT(1978) (Annexe N° 1).
- ❖ L'analyse granulométrique permet à l'aide de différents tamis de déterminer la distribution de différentes dimensions des grains examinés. Après effectuer l'opération de tamisage (arrêt de vibration de tamiseur dans un temps de 10 minutes), nous enregistrons les résultats obtenus sous forme de tableau. Ces derniers contiennent les quantités (poids) des grains (refus) dans chaque tamis, correspondant pour chaque échantillon. Les résultats de l'analyse granulométrique révèlent des pourcentages de sable qui sont supérieurs à 70% (voir le Tableau N° 3). Selon le triangle de texture

(FAO) qui permet de déterminer la classe texturale des sols, la zone d'étude présente des sols essentiellement sableux.

- ❖ La teneur en calcaire du sol étudié est faible étant de l'ordre de $\text{CaCO}_3 = 0.82$, le sol est considéré peu calcaire (BERNARD, 2000 In MENACER, 2009) (Annexe N° 3).

V.1.2. Caractéristiques du biochar

Le tableau ci-dessous présente les résultats des analyses des échantillons de biochars produits à partir de la boue résiduaire de la station d'épuration (STEP Touggourt) :

Tableau N° 4: Propriétés physico-chimiques de biochars B1 et B2

Biochar	pH	CE (dS/m)	MO (%)	CaCO ₃ (%)	Rendement (%)
B1	6.93	3.38	53.33	5.15	78.37
B2	7.84	4.99	30	8.005	53.88

B1 : Biochar des boues résiduaires (300 °C) ; B2 : Biochar des boues résiduaires (500 °C).

- ❖ Lorsque la température de pyrolyse est passée de 300 à 500°C, la teneur en matière organique diminue. La raison de ce phénomène selon HUANG et *al* ; (2017) est que plus de matière organique serait décomposée et convertie à une température de pyrolyse plus élevée.
- ❖ On constate d'après les résultats que la CE des deux types de biochars est différente. La CE de biochar de la boue résiduaire (300 °C) est de 3.38dS/m, inférieur par rapport à la CE de biochar de la boue résiduaire (500°C) qui est de l'ordre de 4.99dS/m. La CE est souvent utilisée pour estimer la quantité de sels dissous totaux dans les échantillons et doit être prise en compte lors de l'évaluation des biochars potentiels à usage agricole. Les matériaux qui ont une salinité élevée doivent être appliqués sur le sol à des taux contrôlés pour éviter une toxicité potentielle pour les plantes (SONG et GUO 2012 In FIGUEIREDO et *al* ; 2017).
- ❖ Les valeurs de pH des biochars ont progressivement augmenté d'acide à alcalin avec l'augmentation de la température de pyrolyse. Les résultats nous ont donné un pH= 6.93 pour le B1 et pH= 7.84 pour le B2. Il y a deux raisons à ce phénomène : (i) la libération de sels alcalins de la structure pyrolytique ; (ii) l'azote organique présent sous forme de fonctionnalités amine transformées en composés de type pyridine, et la quantité de groupes fonctionnels de surface acides a diminué pour les pertes en pourcentage d'oxygène lorsque la température a augmenté (CHEN et *al* ; 2014 In

HUANG *et al* ; 2017). En 2009, la Chine a publié une importante norme nationale, à savoir « Élimination des boues de la station d'épuration municipale — qualité des boues utilisées pour l'amélioration des terres ». Sur la base de cette norme, le pH des boues appliquées pour l'amélioration des terres doit être compris entre 5,5 et 10,0 et la teneur en matière organique doit être supérieure à 10 % (HUANG *et al* ; 2017). De toute évidence, les valeurs de pH et la teneur en matière organique des produits de biochar respectaient toutes les critères mentionnés ci-dessus.

Des valeurs de pH plus élevées dans les biochars peuvent être liées à des concentrations accrues d'éléments alcalins, tels que les oxydes de Ca et de Mg et leurs réactions alcalines (FIGUEIREDO *et al* ; 2017).

- ❖ La teneur en calcaire dans le biochar des boues résiduaire (300 °C) est de 5.15 %, inférieure par rapport au biochar des boues résiduaire (500 °C) qui est de l'ordre de : 8.005. La teneur en CaCO₃ dans des types de biochar est moyennement calcaire (BERNARD, 2000 In MENACER, 2009) (Annexe N° 3).
- ❖ D'après les résultats, on constate que la pyrolyse a réduit la masse initiale des boues et l'augmentation de la température de pyrolyse a entraîné une diminution du rendement du biochar. Le rendement de B1 est de 78.37 % de la masse sèche des boues tandis que B2 est de 53.88 %. La diminution du rendement en biochar pourrait être liée à une conversion supplémentaire par pyrolyse. En d'autres termes, elle pourrait être attribuée à une décomposition primaire plus importante de la charge initiale ou à des réactions secondaires du résidu solide (AGRAFIOTI *et al* ; 2013 In HUANG *et al* ; 2017).

Les propriétés physicochimiques des biochars sont directement reliées aux conditions de pyrolyse et principalement dépendantes de la température (LEHMANN, 2007).

V.2. Effets du biochar sur les propriétés physiques du sol

Parmi les indicateurs courants pour apprécier la qualité physique du sol selon DORAN et PARKIN (1996), GUGINO *et al* ; (2009) In GUO (2016) : la densité apparente et la perméabilité.

V.2.1. Effet du biochar sur la densité apparente

La densité apparente D_a a été calculée en divisant la masse du sol par le volume du sol. Les valeurs de D_a sont notées dans les figures N° 9, 10, 11, 12 et 13 :

V.2.1.1. Effet du biochar sur la densité apparente initiale

Les résultats obtenus concernant l'influence du taux d'application de biochar sur la D_a initiale sont représentés dans la figure N° 9 :

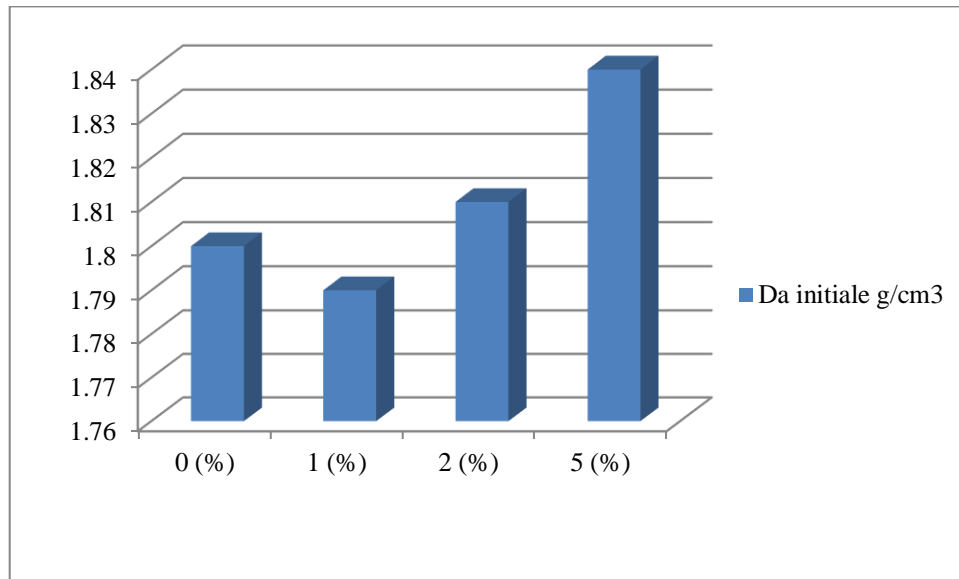


Figure N° 9: Influence du taux d'application de biochar sur la D_a initiale

- On constate une augmentation dans la D_a initiale de 1,79 à 1,84 g/cm³, avec l'augmentation du taux d'application de 1 à 5 % respectivement. On enregistre une D_a initiale de 1,8 g/cm³ pour le témoin.
- L'analyse de variance (Annexe N° 7) montre l'effet non significatif mais, généralement l'amendement au biochar réduit la densité apparente du sol en introduisant plus de pores et de vides. PEAKE et *al* ; (2014) ont signalé que l'ajout d'un biochar de sciure de bois à un taux aussi faible que 0,1 % à huit sols de texture différente (allant du sable limoneux au limon argileux limoneux) a entraîné des diminutions de 2,1 à 6,1 % (en moyenne 3,3 %) de la densité apparente du sol.

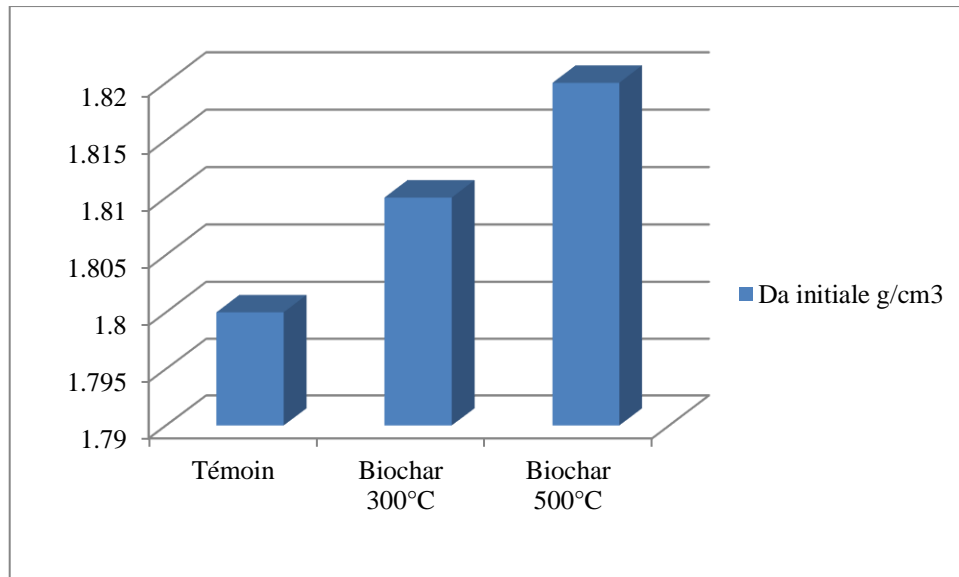


Figure N° 10: Influence du type de biochar sur la Da initiale

- On note une Da initiale élevée avec le B2 de l'ordre de 1,82 g/cm³ par rapport B1 qui est de l'ordre de 1,81 g/cm³ (figure N° 10).
- L'importance de la diminution de la densité apparente du sol, cependant, est liée au taux d'amendement du biochar et est influencée par le type de biochar. À de faibles taux d'amendement du biochar, la diminution peut ne pas être nécessairement mesurable. Les biochars dérivés des graminées et des résidus de cultures sont plus « duveteux » (densité apparente inférieure) et entraînent généralement des diminutions plus importantes de la densité apparente du sol que les biochars dérivés du bois, des coquilles de noix et de la litière de volaille étant donné les mêmes taux d'application (NOVAK et al ; 2012). Des diminutions significatives de la densité apparente du sol à partir de l'amendement au biochar ont également été signalées dans de nombreuses autres études (ZHANG et al ; 2010; JONES et al ; 2011; CASE et al ; 2012). Parallèlement à la diminution de la densité apparente, la porosité du sol et la SSA sont généralement augmentées par l'amendement au biochar.

V.2.1.2. Effet du biochar sur la densité apparente finale

Les résultats obtenus concernant l'influence du taux d'application de biochar sur la Da finale sont représentés dans la figure N° 11 :

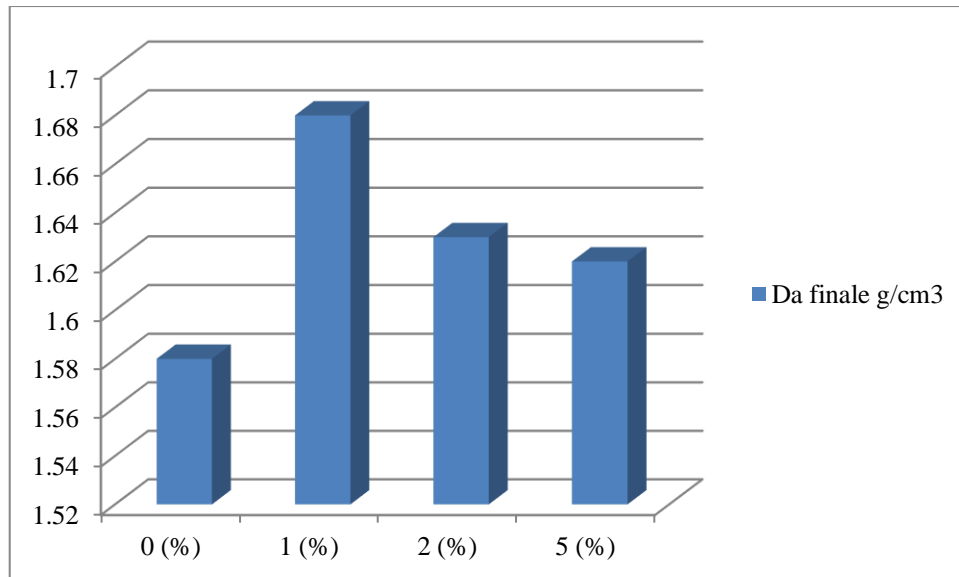


Figure N° 11: Influence du taux d'application du biochar sur la Da finale

- On observe une diminution de la Da finale (après 2 mois d'incubation) de 1,68 à 1,62 g/cm³ avec l'augmentation du taux d'application de biochar de 1 à 5 % respectivement. On enregistre une Da finale de 1,58 g/cm³ pour le traitement sans biochar (figure N° 11).

Selon GUO (2016), l'incorporation de biochar dans le sol fournit un effet de relâchement en introduisant des micropores supplémentaires et en créant des macropores d'hébergement et, par conséquent, réduit la densité apparente du sol.

Selon GUO (2016), l'amendement au biochar réduit la densité apparente du sol en introduisant plus de pores et de vides. Par exemple, PEAKE et al ; (2014) ont signalé que l'ajout d'un biochar de sciure de bois à un taux aussi faible que 0,1 % (p/p) à huit sols de texture différente (allant du sable limoneux au limon argileux limoneux) a entraîné des diminutions de 2,1 à 6,1 % (en moyenne 3,3 %) de la densité apparente du sol par rapport aux sols non amendés en pots après lessivage et décantation de l'eau. BUSSCHER et al ; (2010) ont présenté que dans les mêmes conditions de décantation pendant 44 jours, un sable limoneux de Norfolk amendé avec <0,6 mm de noix de pécan (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch) dérivé de la coquille le biochar à 20 g/kg (2% w/w) a démontré une densité apparente (1,45 g/cm³) inférieure à celle du sol témoin (1,52 g/cm³). Le lessivage des colonnes de sol pendant 118 jours a donné une densité apparente de 1,50 g/cm³ dans le sable limoneux de Norfolk amendé avec moins de 0,25 mm de biochar dérivé de panic raide (*Panicum virgatum* L.) (produit par pyrolyse à 500 °C) à 20 g/kg, sensiblement inférieur à celui (1,57 g/cm³) des colonnes de contrôle non modifiées (NOVAK et al ; 2012). LAIRD et al ; (2010)

ont également remarqué que la densité apparente des colonnes de sol reconditionné recevant 0,5 à 2 % (p/p) d'amendement au biochar de bois (<0,5 mm) était significativement inférieure à celle des colonnes de contrôle non amendées (c.-à-d. 1,24 contre 1,36 g/cm³) après 500 jours d'incubation et de lessivage en laboratoire.

- L'analyse de la variance (Annexe N° 11) montre que les doses de biochar ont un effet non significatif sur la Da finale.

Les résultats obtenus concernant l'influence du type de biochar sur la Da finale sont représentés dans la figure suivante :

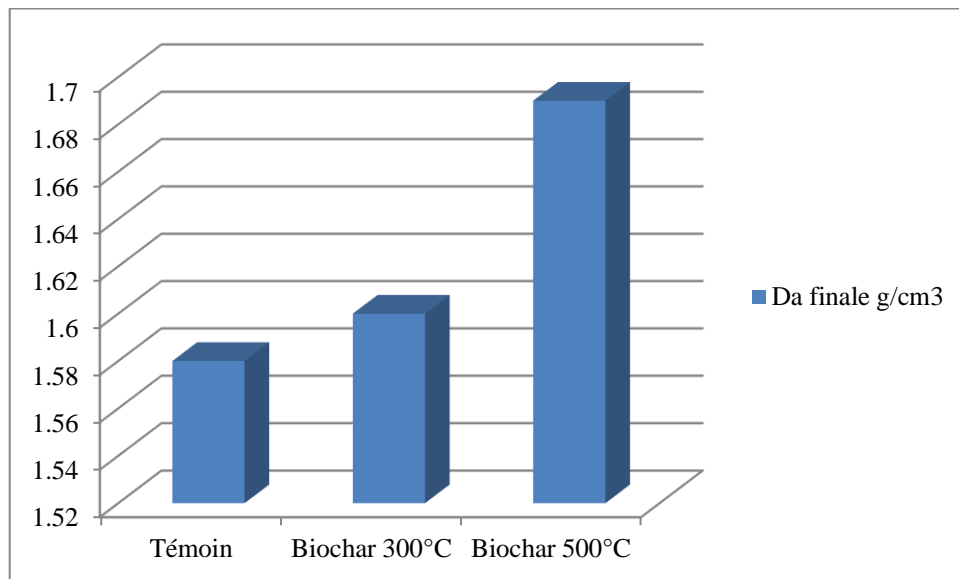


Figure N° 12: Influence du type de biochar sur la Da finale

- D'après la figure N° 12, on constate que la Da finale de B2 est élevée (1,69 g/cm³) par rapport au B1 qui est de l'ordre de 1,60 g/cm³.

V.2.1.3. Comparaison entre la densité apparente initiale et finale

La figure N° 13 représente la comparaison entre la Da initiale et Da finale (après 2 mois d'incubation) :

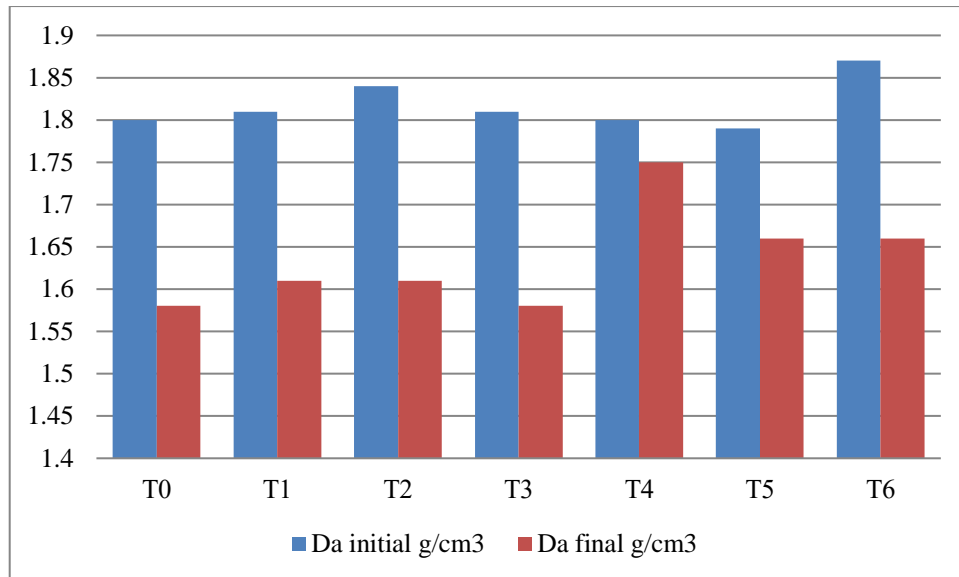


Figure N° 13: Comparaison entre la Da initiale et Da finale

- D'après la figure N° 13, les résultats obtenus montre que la densité apparente initiale est supérieure par rapport la densité apparente finale dans tous les traitements.
- Les résultats de l'analyse de variance montrent l'effet significatif. Donc, l'application de biochar dans le sol diminue la densité apparente.

V.2.2. Effet du biochar sur la perméabilité

La perméabilité dans la zone saturée (Ks) a été déterminée par une méthode à tête tombante dans des échantillons du sol dans un perméamètre de laboratoire. Les valeurs de Ks sont notées dans les figures N° 14 et 15 :

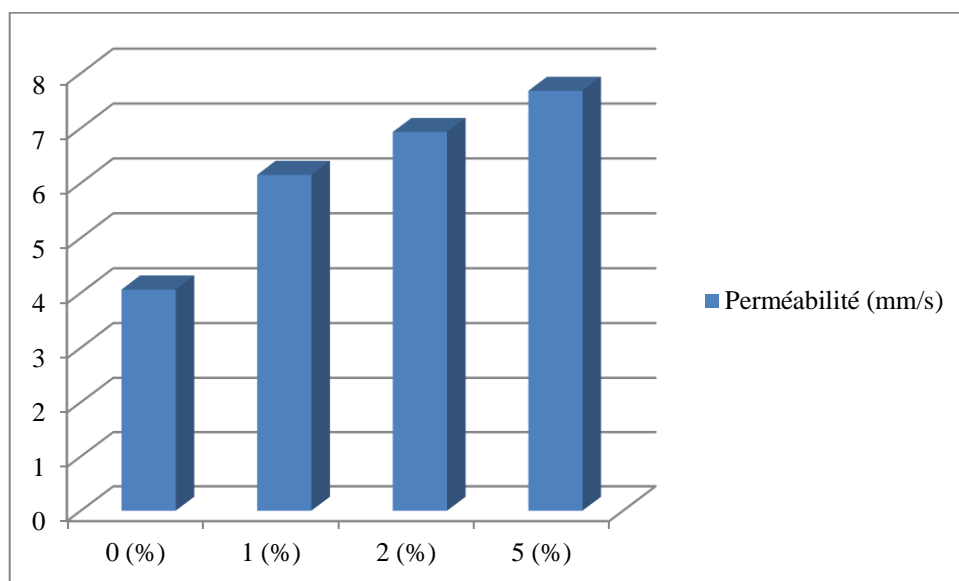


Figure N° 14: Influence du taux d'application de biochar sur la perméabilité

- Les résultats obtenus dans la figure N° 14 montrent que l'augmentation des doses de biochar de 1 à 5 % conduit à l'augmentation de perméabilité de 6,15 à 7,68 mm/s respectivement. Pour le témoin, on enregistre une perméabilité de l'ordre de 4,06 mm/s. L'analyse de variance (Annexe N° 9) montre l'effet significatif.
- Certaines études ont indiqué que l'application de biochar augmentait le KS dans les sols à texture fine (NOVAK et al ; 2016; BARNES et al ; 2014). L'augmentation de KS concorde avec l'augmentation de la porosité globale de ces sols.

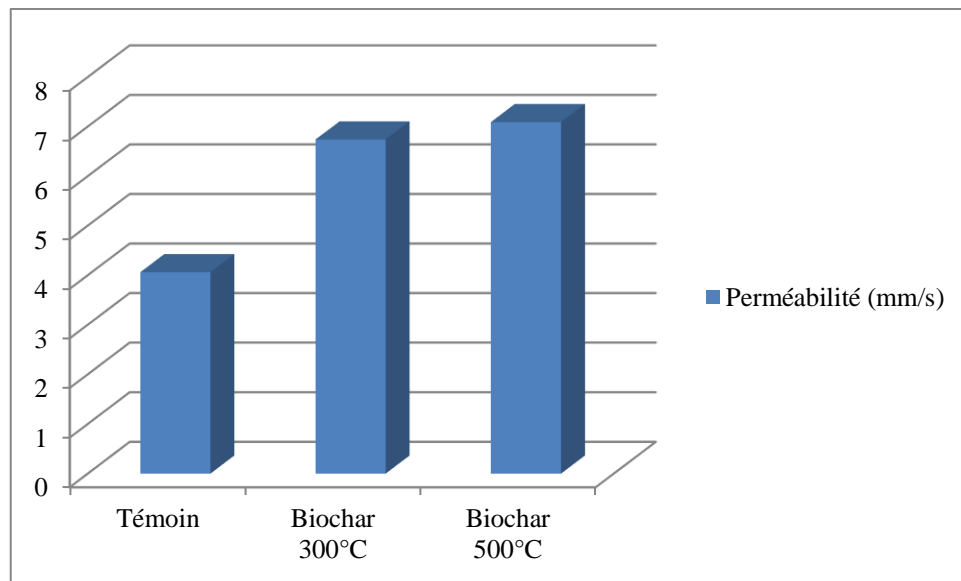


Figure N° 15: Influence du type de biochar sur la perméabilité

- D'après la figure N° 15, les résultats obtenus montre que la perméabilité est élevée avec le B2 par rapport au B1.
- L'analyse de la variance (Annexe N° 9) montre que l'influence du type de biochar est significative.

Selon GUO (2016), l'infiltration d'eau et la percolation profonde dans le sol sont des processus hydrologiques importants par lesquels le sol régule le mouvement de l'eau. Pour réduire les risques de ruissellement de surface et assurer un bon drainage, des taux d'infiltration du sol et une conductivité hydraulique élevés sont souhaités. L'amendement de biochar influence le mouvement de l'eau dans le sol. L'effet, encore une fois, dépend du type de sol, de la qualité du biochar (par exemple, la taille des particules et la porosité) et le taux d'application (HERATH et al ; 2013). BUSSCHER et al ; (2010) ont découvert que l'incorporation de <2 mm de biochar dérivé de coque de noix de pécan dans un sable limoneux de Norfolk à 0,5, 1,0 et 2,0 % (p/p) augmentait le taux d'infiltration du sol (dans les colonnes reconditionnées avec 70 jours d'incubation à 10 % d'humidité) de 1,1 mm/min à 2,7,

1,7 et 2,0 mm/min, respectivement. Par rapport aux témoins non modifiés, les colonnes de sol d'un loam limono-argileux modifié avec du biochar dérivé de coque de riz à 10 % (p/p) ont démontré une augmentation notable de la conductivité hydraulique saturée (K_{sat}) après 168 j d'incubation et de lessivage, tandis que l'effet de l'amendement du biochar à des taux de 1 et 5 % n'était pas prononcé (HSEU et *al* ; 2014). L'amendement du sol avec du biochar à base de fumier laitier < 2 mm à 2 % (p/p) a augmenté le K_{sat} d'un limoneux sableux de 64,3 à 67,2 cm/j et d'une argile limoneuse de 53,2 à 57,6 cm/j après 90 jours d'incubation (OUYANG et *al* ; 2013). L'incorporation de biochars à base de tiges de maïs à raison de 1,0 à 1,5 % (p/p) dans deux sols limono-limoneux a significativement augmenté le K_{sat} et facilité le drainage du sol après 295 jours d'incubation en laboratoire (HERATH et *al* ; 2013). Probablement, l'incorporation de biochar granulaire (par exemple, 0,2-10 mm) améliorerait l'infiltration et la conductivité hydraulique des sols à texture fine, tandis que l'application de biochar pulvérulent (par exemple, principalement <0,2 mm) réduirait l'infiltration et la conductivité hydraulique des sols à texture grossière.

L'effet de l'amendement du biochar sur l'amélioration des propriétés physiques du sol dépend cependant du type de sol, de la qualité du biochar et du taux d'amendement et peut changer avec le temps (GUO, 2016).

Conclusion

Conclusion

Notre étude a porté sur l'influence de deux types de biochar des boues résiduaires (300 et 500°C) et leurs taux d'application sur les propriétés physiques du sol sableux à savoir la densité apparente et la perméabilité dans la région de Ouargla.

L'analyse de l'ensemble des paramètres étudiés permet de tirer les conclusions suivantes :

Les résultats ont montré que la matière organique et le rendement des biochars produits diminuent tandis que CE, pH et teneur en calcaire augmentent avec l'augmentation de la température de pyrolyse.

Les résultats des analyses concernant l'influence de biochar sur les propriétés physiques du sol : tous les traitements ont connu une augmentation de la densité apparente du sol et l'application de biochar augmente de manière significative la perméabilité.

Nos perspectives de ce travail pour la recherche de l'avenir sont :

- L'étude des facteurs prédominants qui empêchent l'amélioration de la qualité du sol par l'ajout de biochar.
- L'approfondissement davantage des analyses de biochar surtout le faciès chimique.

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

1. **ADEME, 2001 : ADEME, BRGM.** " *Guide pour le dimensionnement et la mise en oeuvre des couvertures de sites de stockage de déchets ménagers et assimilés.* " A. Editions. Paris 157 (2001).
2. **AGRAFIOTIA A., BOURASAA., KALDERISB B., DIAMADOPOULOSAA., 2013.***Biochar production by sewage sludge pyrolysis.* Journal of Analytical and Applied Pyrolysis (101) pp 72–78.
3. **AMIR, S., HAFIDI, M., MERLINA, G. and REVEL, J.C. (2005)** *Sequential Extraction of Heavy Metals during Composting of Sewage Sludge.* Chemosphere, 59, 801-810.
4. **ANRED, 1982 : COLIN, F.** "*Décharge Industrielle et Milieu Naturel: Etudes et Recherches 1978- 1982.*" *Etude du devenir de l'eau et de son interaction avec les déchets dans une décharge admettant des déchets industriels homogènes (boues d'épuration d'effluents industriels).* ANRED, 1983.
5. **ATKINSON, C.J., FITZGERALD, J.D., HIPPS, N.A., 2010.** *Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review.* Plant Soil 337(1–2), 1–18.
6. **AUBERT G., 1978,** *Méthodes d'analyses des sols,* Cent. Nat. Doc. Pédag., Marseille, 191 p.
7. **BAGNOULS F. et GAUSSEN H., 1953-** Saison sèche et indice xéothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse,* 88 : 193-239.
8. **BAGNOULS F. et GAUSSEN G., 1957-** Climats biologiques et leur classification. *Annales de Géographie,* 355: 193-220.
9. **BAGREEY, A., BANDOSZ, T.J., LOCKE, D.C., 2001.***Pore structure and surface chemistry of adsorbents obtained by pyrolysis of sewage sludge-derived fertilizer.* Carbon 39, 1971–1979.
10. **BAIZE et al. (2006: STERCKEMAN, THIBAUT, et al .** "*Trace elements in soils developed in sedimentary materials from Northern France.* " *Geoderma*36.3-4 (2006): 912-929.
11. **BASSO A., MIGUEZ F., LAIRD D., HORTON R., WESTGATE M., 2013,** *Assessing potential of biochar for increasing waterholding capacity of sandy soils,* GCB Bioenergy (5) pp : 132-143.

12. **BENTERROUCHE, 2007 : SORIANO - MAS, CARLES, et al.** *"Identifying patients with obsessive- compulsive disorder using whole - brain anatomy ."* Neuroimage 35.3 (2007) : 1028-1037.
13. **BIEDERMAN, L.A., HARPOLE, W.S., 2013.** *Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis.* GCB Bioenergy 5, 202–214.
14. **BOUSSELHAJ, 1996 : Ouazzani, Naïla, Khadija Bousselhaj, and Younes Abbas.** *"Reuse of wastewater treated by infiltration percolation."* Water Science and Technology 33.10-11 (1996): 401-408.
15. **BOUTEBILA A. S., 1973.-** *Rapport de la délégation algérienne (MARA).* Séminaire FAO/PNUD sur la bonification et la mise en valeur des sols sableux au Proche Orient et en Afrique du nord : 24-26.
16. **BREWER, C.E., HU, Y-Y., SCHMIDT-ROHR, K., LOYNACHAN, T.E., LAIRD, D.A., BROWN, R.C., 2012.** *Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. (Special Issue: Environmental benefits of biochar.).* Journal of Environmental Quality 41, 1115–1122.
17. **BREWER, C.E., UNGER, R., SCHMIDT-ROHR, K., BROWN, R.C., 2011.** *Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties.* BioEnergy Research 4, 312–323.
18. **BRUUN, E.W; AMBUS, P., EGSGAARD, H., HAUGGARD-NIELSEN, H., 2012.** *Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics.* Soil Biology and Biochemistry 46, 73– 79.
19. **CHAN, K.Y., XU, Z., 2009.** *Biochar : nutrient properties and their enhancement.* Dans : Lehmann, J., Stephen, J. (Eds): *Biochar for environmental management. Science and technology.* Earthscan Washington. pp: 67–84.
20. **CHENG, C.-H., LEHMANN, J., THIES, J.E., BURTON, S.D., ENGELHARD, M.H., 2006.** *Oxidation of black carbon by biotic and abiotic processes.* Organic Geochemistry 37, 1477–1488.
21. **CHINTALA, R., SCHUMACHER, T.E., KUMAR, S., MALO, D.D., RICE, J.A., BLEAKLEY, B., CHILOM, G., CLAY, D.E., JULSON, J.L., PAPIERNIK, S.K., GU, Z.R., 2014.** *Molecular characterization of biochars and their influence on microbiological properties of soil.* Journal of Hazardous Materials 279, 244–256.
22. **CULOT, 2005 : Culot, M.** *"Filières de valorisation agricole des matières organiques."* Faculté Universitaire des Sciences Agronomique.Laboratoire d'Écologie

- microbienne et d'Épuration des Eaux (LEMEE) 73p (2005).
23. **DING, Y., LIU, Y., LIU, S., LI, Z., TAN, X., HUANG, X., ZENG, G., ZHOU, L., ZHENG, B., 2016.** *Biochar to improve soil fertility. A review.* *Agronomy for Sustainable Development* 36, 36.
24. **DUTTA, B., RAGHAVAN, G.S.V., NGADI, M., 2012.** *Surface characterization and classification of slow and fast pyrolyzed biochar using novel methods of pycnometry and hyperspectral imaging.* *Journal of Wood Chemistry and Technology* 32, 105–120.
25. **ENDERS A. et LEHMANN J., 2017,** *Proximate analyses for characterising biochars* In *Biochar : A guide to analytical methods*, pp : 11-22.
26. **FRANCA A.S, OLIVEIRA L.S, NUNES A.A,ALVESC.C.O. (2010),***Microwave assisted thermal treatment of defective coffee beans press cake for the production of adsorbents,* *Bioresource Technology* 101 ,1068–1074.
27. **GADDA N.H, 2013-** *Impacts des eaux usées épurées sur les propriétés physico-chimiques des sols dans la région de Ouargla,* Mém. Master Académique en Science de l'environnement, UKM Ouargla, 86 p.
28. **GARREC et al . , 2003 : POURCHER, Anne – MARIE, et al ."** *Survival of faecal indicators and enteroviruses in soil after land - spreading of municipal sewage sludge . "* *Applied Soil Ecology* 35.3 (2007) : 473-479.
29. **GIRARD et al., 2005 : Moussa-Machraoui, Sihem Ben, et al. "***Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi- arid conditions in northwestern Tunisia."* *Soil and Tillage Research* 106.2 (2010): 247-253.
30. **GONDE H., CARRE G., JUSSIUX Ph., GONDE R., 1968 -** *Cours d'agriculture moderne.* La maison rustique, 628 p.
31. **GOOGLE EARTH, 2022 a–** *Carte de Ouargla,* disponible sur : <https://earth.google.com/web/@31.95051883,5.33299954,144.39477902a,27919.97797749d,35y,0h,0t,0r>, consulté le 06/29/2022
32. **GUO M., 2016,** *Application of biochar for soil physical improvement* In *Agricultural and environmental applications of biochar : advances and barriers*, pp : 101-122.
33. **HALILAT M.T., 1993-** *Etude de la fertilisation azotée et potassique sur le blé dur (variété al dura) en zone saharienne (région d'Ouargla).* Mém. magistère. INFS d'agronomie, Batna, 132 p.
34. **HAMDI AISSA B., 2001-** *Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara*

- (Cuvette de Ouargla). *Approche micro morphologique, et organisation spatiale*. Thèse Doct., I.N.A-PG, Paris, 310 p.
35. **HARDIE, M., CLOTHIER, B., BOUND, S., OLIVER, G., CLOSE, D., 2014.** *Does biochar influence soil physical properties and soil water availability*. *Plant Soil* 376 (1–2), 347–361.
36. **HERATH, H.M.S.K., CAMPS-ARBESTAIN, M., HEDLEY, M., 2013.** *Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: an Alfisol and an Andisol*. *Geoderma* 209–210, 188–197.
37. **IDDERT., BELLALLOUI M., 1990.-** *Etude du compostage des ordures ménagères de la ville de Blida*. Mémoire Ing. Génie de l'Environnement, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 83 p.
38. **JEFFERY, S., MEINDERS, M.B.J., STOOF, C.R., BEZEMER, T.M., VAN de VOORDE, T.F.J., MOMMER, L., VAN GROENIGEN, J.W., 2015.** *Biochar application does not improve the soil hydrological function of a sandy soil*. *Geoderma* 251–252, 47–54.
39. **JOSEPH, S., PEACOCKE, C., LEHMANN, J., MUNROE, P., 2009.** *Developing a biochar classification and test methods*. Dans : *Lehmann, J., Stephen, J. (Eds): Biochar for environmental management*. Science and technology. Earthscan Washington. pp: 106–126.
40. **KINNEY, T.J., MASIELLO, C.A., DUGAN, B., HOCKADAY, W.C., DEAN, M.R., ZYGOURAKIS, K., BARNES, R.T., 2012.** *Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures*. *Biomass and Bioenergy* 41, 34–43.
41. **LAMINI A, (2012),** *étude géochimique et minéralogique des chotts de la région d'el Hadjira*. Thèse magister. Univ. Ouargla. 132 p.
42. **LANG, T., JENSEN, A.D., JENSEN, P.A., 2005.** *Retention of organic elements during solid fuel pyrolysis with emphasis on the peculiar behavior of nitrogen*. *Energy and Fuels* 19, 1631–1643.
43. **LEHMANN, J., 2007.** *Bio-energy in the black*. *Frontiers in Ecology and the Environment* 5, 381–387.
44. **LEHMANN, J., JOSEPH S., 2009.** *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, Sterling, VA.
45. **LEHMANN, J., RILLIG, M.C., THIES, J., MASIELLO, C.A., HOCKADAY, W.C., CROWLRY, D., 2011.** *Biochar effects on soil biota - a review*.

- Soil Biol. Biochem.* 43, 1812–1836.
46. LIANG, B., SOLOMON, D., KINYANGI, J., GROSSMAN, J., O'NEILL, B., SKJEMSTAD, J.O., THIES, J., LUIZAO, F.J., PETERSEN, J., NEVES, E.G., 2006. *Black Carbon increases cation exchange capacity in soils*. Soil Science Society of America Journal 70, 1719–1730.
47. MAHMOOD, S., FINALY, R.D., FRANSSON, A.M., WALLANDER, H., 2003. *Effects of hardened wood ash on microbial activity, plant growth and nutrient uptake by ectomycorrhiza spruce seedlings*. FEMS Microbiol. Ecol. 43, 121–131.
48. MAO, J.D., JOHNSON, R.L., LEHMANN, J., Oik, D.C., NEVES, E.G., THOMPSON, M.L., SCHIDT-ROHR, K., 2012. *Abundant and stable char residues in soils: implications for soil fertility and carbon sequestration*. Environmental Science and Technology 46, 9571–9576.
49. MONOD T. (1992): Du désert. Sécheresse., Vol. 3 n°1, pp 7-24.
50. MUKHERJEE, A., LAL, R., 2013. *Biochar impacts on soil physical properties and greenhouse gas emissions*. Agronomy 3 (2), 313–339.
51. MUKHERJEE, A., ZIMMERMANM, A.R., HAMDAN, R., COOPER, W.T., 2014. *Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months of field aging*. Solid Earth 5, 693–704.
52. NAJI S., 2015- *Enquête sur l'état d'infestation des cultures maraichères par les meloïdogyne (Nematoda Meloïdogynidae) dans les régions d'Adrar et d'Ouargla*, Mém. d'Ingénieur d'Etat en Agronomie Saharienne, 43 p.
53. NEMATI, M.R., SIMARD, F., FORTIN, J.-P., BEAUDOIN, J., 2014. *Potential use of biochar in growing media*. Vadose Zone Journal 14 (6).
54. NEZLI, I.E. (2004). *Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued M'ya (Ouargla)*. Mémoire de Magister en Géologie, Université de Annaba, Algérie, 100p.
55. NOVAK, J.M., BUSSCHER, W.J., LAIRD, D.L., AHMEDNA, M., WATTS, D.W., NIANDOU, M.A.S., 2009b. *Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern Coastal Plain soil*. Soil Science 174, 105–112.
56. NOVAK, J.M., LIMA, I., XING, B., GASKIN, J.W., STEINER, C., DAS, K.C., AHMEDNA, M., REHRAH, D., WATTS, D.W., BUSSCHER, W.J., SCHOMBERG, H., 2009a. *Characterization of designer biochar produced at*

- different temperatures and their effects on a loamy sand. Annals of Environmental Science* 3, 195–206.
- 57. O.T.V, 1997:** *Fox, D. M., R. B. Bryan, and A. G. Price. "The role of soil surface crusting in desertification and strategies to reduce crusting." Environmental monitoring and assessment* 99.1-3 (2004): 149-159.
- 58. ONM Ouargla, 2019-** *rapport sur les données climatiques de la région de Ouargla*, Office National de la Météorologie de Ouargla, 5 p.
- 59. PEAKE, L.R., REID, G.J., TANG, X., 2014.***Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. Geoderma* 235–236, 182–190.
- 60. PEREZ, S., FARRE, M., GARCIA, M.J., BARCELO, D., 2001.***Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons in sewage sludge and their contribution to its toxicity in the ToxAlert ®100 bioassay. Chemosphere*, 45, 705-712.
- 61. PITUELLO, C., FRANCIOSO, O., SIMONETTI, G., PISI, A., TORREGGIANI, A., BERTI, A., MORARI, F., 2015.***Characterization of chemical–physical, structural and morphological properties of biochars from biowastes produced at different temperatures. Journal of Soils and Sediments* 15,792–804.
- 62. RAJKOVICH, S., ENDERS, A., HANLEY, K., HYLAND, C., ZIMMERMAN, A.R., LEHMANN, J., 2012.***Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. Biology and Fertility of Soils* 48, 271–284.
- 63. ROGOVSKA, N., LAIRD, D., CRUSE, R.M., TRABUE, S., HEATON, E., 2012.***Germination tests for assessing biochar quality. (Special Issue: Environmental benefits of biochar.). Journal of Environmental Quality* 41, 1014–1022.
- 64. ROUVILLOIS-BRIGOLM., 1975-***le pays de Ouargla, Sahara algérien-Ed-département de géographie de l'université de paris-soobonne.*389p.
- 65. SAHLSTROM, L., ASPAN, A., BAGGE, E., THAM M.L.D., ALBIHN, A., 2004.***Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. Water Research*, 38, 1989-1994.
- 66. SCHIMMELPFENNIG, S., GLASER, B., 2012.***One step forward toward characterization: some important material properties to distinguish biochars. (Special Issue: Environmental benefits of biochar.). Journal of Environmental Quality* 41,

- 1001–1013.
67. SHIH, 1990 : SBIH, FATIMA-ZOHRA, et al. "Persistent measles virus infection in vero and McCoy cell lines." *Actavirologica* 34.3 (1990): 272-281.
68. SINGH B., DOLK M. M., SHEN Q., CAMPS-ARBESTAIN M., 2017, *Biochar pH, electrical conductivity and liming potential* In *Biochar : A guide to analytical methods*, pp : 23-38.
69. SINGH, R., BABU, J.N., Kumar, R., SRIVASTAVA, P., SINGH, P., RAGHUBANSHI, A.S., 2015. *Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective*. *Ecological Engineering* 77, 324–347.
70. TERCE, 2001 : MARTINEZ, LAURENTO. , et al ." *Ectopic β - chain of ATP synthase is an apolipoprotein A1 receptor in hepatic HDL endocytosis .* " *Nature* 421.6918 (2003) : 75.
71. WANG G., LI Q., DZAKPASU M., GAO X., YUWEN C., WANG X.C., 2018, *Impacts of different biochar types on hydrogen production promotion during fermentative co-digestion of food wastes and dewatered sewage sludge*, *Waste Management* (80) pp : 73-80.
72. WANG, X.L., SATO, T., XING, B.S., 2006. *Competitive sorption of pyrene on wood chars*. *Environmental Science and Technology* 40, 3267–3272.
73. WARNOCK, D.D., LEHMANN, J., KUYPER, T.W., RILLING, M.C., 2007. *Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms*. *Plant and Soil* 300, 9–20.
74. WATTS, C.W., WHALLEY, W.R., BROOKES, P.C., DEVONSHIRE, B.J., WHITMORE, A.P., 2005. *Biological and physical processes that mediate micro-aggregation of clays*. *Soil Science* 170, 573–583.
75. WERTHER et OGADA, 1999 : Hossain, Mustafa K., et al. "Agronomic properties of wastewater sludge biochar and bioavailability of metals in production of cherry tomato (*Lycopersi:con esculentum*)."*Chemosphere* 78.9 (2010): 1167-1171.
76. ZEBARTH et al . , 2000 : DEAN, D. M. , et al ." *Poultry manure effects on soil nitrogen processes and nitrogen accumulation in red raspberry .* " *Canadian Journal of Plant Science* 80.4 (2000) : 849-860.
77. ZEKAD, 1982: *Etude dynamique de la teneur en métaux lourds après addition de résidus urbains*.
78. ZERGOUN M., 1997. *Contribution à l'amélioration de l'efficacité des installations type*

pivot en régions sahariennes. Mém. Ing., Ouargla, 58p.

Annexes

Annexe N° 1: Echelles d'interprétation de pHe (1 :2.5) (AUBERT, 1978).

Extrait 1/2,5	
Valeur de pH	Classe d'interprétation
< 4.5	Extrêmement acide
4.5 - 5.0	Très fortement acide
5.1 - 5.5	Fortement acide
5.6 - 6.0	Moyennement acide
6.1 - 6.5	Légèrement acide
6.6 - 7.0	Très Légèrement acide
7.1 - 7.5	Très Légèrement alcalin
7.6 - 8.0	Légèrement alcalin
8.1 - 8.5	Moyennement alcalin
> 8.5	Très fortement alcalin

Annexe N° 2: Echelle de la salinité pour l'extrait (1/5) (AUBERT, 1978).

CE (dS/m) à 25°C	Degré de salinité
≤ 0,6	Sol non salé
0,6 < C.E. ≤ 2	Sol peu salé
2 < C.E. ≤ 2,4	Sol salé
2,4 < C.E. ≤ 6	Sol très salé
> 6	Sol extrêmement salé

Annexe N° 3: L'interprétation de calcaire total CaCO₃ (%) (BERNARD, 2000 in MENACER, 2009)

Valeur de CaCO₃ %	Classe d'interprétation
0 à 5%	Sol peu Calcaire
5 à 15%	Sol moyennement calcaire
15 à 30%	Sol calcaire
> 30%	Sol très calcaire

Annexe N° 4: L'échelle de MO% (MORAND, 2001)

MO %	Classe d'interprétation
0.5 à 1 %	Très faible en MO
1 à 2%	Faible en MO
2 à 3%	Moyennement (ou modérée) en MO
3 à 5 %	Elevée en MO
> à 5%	Très élevée en MO

Annexe N° 5 : Les caractéristiques physiques des sols (après expérimentation)

traitement	Da initial g/cm ³	Da final g/cm ³	Perméabilité K (mm/s)
T0	1,8	1,58	4,06
T1	1,81	1,61	5,09
T2	1,84	1,61	6,13
T3	1,81	1,58	9,02
T4	1,8	1,75	7,22
T5	1,79	1,66	7,73
T6	1,87	1,66	6,34

Annexe N° 6: Statistiques descriptives de la densité apparente initial

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Mini mum	Maxi mum	Moye nne	Ecart- type
Da initial g/cm ³	21	0	21	1,590	2,200	1,817	0,141

Annexe N° 7: Analyse de variance sur la densité apparente initial

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Température	2	0,001	0,000	0,012	0,988
Pourcentage de biochar %	2	0,004	0,002	0,076	0,927
Température* biochar %	2	0,008	0,004	0,149	0,863
Erreur	14	0,383	0,027		
Total corrigé	20	0,396			

Annexe N° 8: Statistiques descriptives de perméabilité

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Mini mum	Maxi mum	Moy enne	Ecart- type
Perméabilité K (mm/s)	28	0	28	3,270	18,84 0	6,514	3,764

Annexe N° 9: Analyse de variance sur la perméabilité

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Température	2	28,835	14,418	0,957	0,400
Pourcentage de biochar %	2	9,303	4,651	0,309	0,738
Température* biochar %	2	27,849	13,924	0,924	0,413
Erreur	21	316,521	15,072		
Total corrigé	27	382,508			

Annexe N° 10: Statistiques descriptives de la densité apparente finale

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Da final g/cm ³	21	0	21	1,480	1,960	1,636	0,122

Annexe N° 11: Analyse de variance sur la densité apparente finale

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Température	1	0,037	0,037	2,263	0,155
Pourcentage de biochar %	2	0,010	0,005	0,305	0,742
Température* biochar %	2	0,007	0,003	0,206	0,816
Erreur	14	0,231	0,017		
Total corrigé	20	0,298			

Annexe N° 12 : Schéma préparation de mélange sol- biochar

(1)



(2)



(3)



(4)

Annexe N° 13 : mesure CE de biochar



Annexe N° 14: mesure pH de biochar



Résumé

Résumé

Etude de l'effet du biochar des boues résiduaires sur la qualité physique du sol sableux (région de Ouargla)

Le biochar est considéré comme une méthode sûre et bénéfique pour l'élimination des boues d'épuration. Le biochar peut être utilisé comme amendement pour améliorer les propriétés physiques du sol.

Ce travail a pour objectif d'étudier l'effet du biochar des boues résiduaires sur les propriétés physiques des sols sableux (région de Ouargla).

L'étude est réalisée dans des pots cylindriques dans la serre semi-contrôlée de l'exploitation de l'ITAS en utilisant un sol à texture sableuse et du biochar produit de la pyrolyse des boues d'épuration à 300 ° C et 500 ° C pendant 1 h avec un accès limité à l'air. Les trois doses de biochar suivants ont été utilisées dans cette expérience : 1 %, 2 % et 5 %.

Les résultats ont montré que la matière organique et le rendement des biochars produits diminuent tandis que CE, pH et teneur en calcaire augmentent avec l'augmentation de la température de pyrolyse.

Les résultats des analyses concernant l'influence de biochar sur les propriétés physiques du sol : tous les traitements ont connu une augmentation de la densité apparente du sol et l'application de biochar augmente de manière significative la perméabilité. Les résultats ont indiqué que l'ajout de biochar a conduit à une amélioration significative des propriétés physiques du sol sableux testé.

Mots clés : sol sableux, biochar, boues résiduaires, Ouargla, propriétés physiques.

ملخص

دراسة تأثير الفحم الحيوي من الحمأة المتبقية على الجودة الفيزيائية للتربة الرملية (منطقة ورقلة)
يعتبر الفحم الحيوي طريقة آمنة ومفيدة للتخلص من حمأة الصرف الصحي. يمكن استخدام الفحم الحيوي كتعديل لتحسين الخصائص الفيزيائية للتربة.
يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير الفحم الحيوي من حمأة الصرف الصحي على الخواص الفيزيائية للتربة الرملية (منطقة ورقلة).

تم إجراء الدراسة في أواني أسطوانية في البيوت البلاستيكية شبه الخاضعة للتحكم في مزرعة ITAS باستخدام تربة ذات قوام رملي وفحم حيوي ناتج من الانحلال الحراري لحمأة الصرف الصحي عند 300 درجة مئوية و 500 درجة مئوية لمدة ساعة واحدة مع وصول محدود للهواء. تم استخدام الجرعات الثلاث التالية من الفحم الحيوي في هذه التجربة: 1% ، 2% ، و 5%.

أظهرت النتائج أن المادة العضوية وإنتاج الفحم الحيوي المنتج يتناقص بينما تزداد الناقلية الكهربائية ، الأس الهيدروجيني ومحتوى الحجر الجيري مع زيادة درجة حرارة الانحلال الحراري.
نتائج التحليلات المتعلقة بتأثير الفحم الحيوي على الخصائص الفيزيائية للتربة: شهدت جميع المعالجات زيادة في الكثافة الظاهرية للتربة ، كما أدى استخدام الفحم الحيوي إلى زيادة النفاذية بشكل كبير. أشارت النتائج إلى أن إضافة الفحم الحيوي أدى إلى تحسن كبير في الخصائص الفيزيائية للتربة الرملية المختبرة.
الكلمات المفتاحية: تربة رملية ، فحم حيوي ، حمأة صرف صحي ، ورقلة ، خواص فيزيائية.

Abstract

Study of the effect of biochar from sewage sludge on the physical quality of sandy soil (Ouargla region)

Biochar is considered a safe and beneficial method for disposal of sewage sludge. Biochar can be used as an amendment to improve the physical properties of the soil.

This work aims to study the effect of biochar from sewage sludge on the physical properties of sandy soils (Ouargla region).

The study is carried out in cylindrical pots in the semi-controlled greenhouse of the ITAS operation using sandy-textured soil and biochar produced from the pyrolysis of sewage sludge at 300°C and 500°C for 1 hour with limited access to air. The following three doses of biochar were used in this experiment: 1%, 2%, and 5%.

The results showed that the organic matter and the yield of the produced biochars decrease while EC, pH and limestone content increase with the increase of the pyrolysis temperature.

The results of the analyzes concerning the influence of biochar on the physical properties of the soil: all the treatments experienced an increase in the bulk density of the soil and the application of biochar significantly increased the permeability. The results indicated that the addition of biochar led to a significant improvement in the physical properties of the tested sandy soil.

Keywords: sandy soil, biochar, sewage sludge, Ouargla, physical properties.