



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université de Larbi Tébessi –Tébessa-

Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie

Département : Biologie des êtres vivants

MEMOIRE de fin d'étude

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Science de la nature et de la vie (SNV)

Filière : Sciences Biologiques

Option : Ecophysiologie végétale

Effet du biochar sur les propriétés physicochimiques du sol et sur la production d'une plante fourragère sous contrainte hydrique et salin

Présenté par :

- M^r. Boukhari Abdeldjalil
- M^r. GOUASSMIA LOUAY

Devant le jury

Pr. Neffar S	Université de Tébessa	Président
Dr. Fatmi H	Université de Tébessa	Examinatrice
Dr. Boudjabi S	Université de Tébessa	Promoteur

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

En tout premier lieu, nous remercions notre Dieu, tout puissant, de nous avoir donné la force et le courage pour pouvoir surmonter toutes les épreuves rencontrées afin de réaliser ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Nous aimerions aussi le remercier pour l'autonomie qu'il nous a accordés et ses précieux conseils.

Nous exprimons toute notre reconnaissance au pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

Nos vifs remerciements vont aussi au qui va nous faire l'honneur d'examiner ce travail.

Nous tenons aussi a remercié toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail. En commençant par les cadres et personnels médicaux des hôpitaux.

Dédicace

Nous remercions tout d'abord notre Dieu qui nous a donné la patience, le courage et la force pour terminer ce modeste travail.

Grand merci à mon père et ma famille en générale pour leur soutien, mon père la source de courage.

Mes frères et mes sœurs, vous êtes toujours avec moi dans mon esprit et mon cœur, vous êtes toujours ici et vous le seraient toujours, merci pour votre soutien.

À tous mes amis, en particulier, vous êtes parmi les rares à mériter d'être appelé amis.

Dédicace

Avant toute chose, je tiens à remercier Dieu le tout puissant, pour m'avoir Donné la force et la patience.

Je dédie ce modeste travail en premier lieu aux personnes qui me sont les plus chères au monde, mon père et ma mère. Il n'y aurait jamais assez de mots pour exprimer ma gratitude et mon amour envers vous.

J'espère du plus profond de mon cœur vous rendre fière, car vous étiez mes piliers durant ce mémoire. Merci pour votre confiance, encouragement et vos prières que bon dieu vous garde.

Merci à mes très chères amies, qui m'ont soutenue et m'ont aidé jusqu'au bout de ce travail.

Et enfin merci à toutes les personnes qui m'ont épaulé de loin ou de pré, je vous présente ma sincère gratitude.

Résumé

La mise en œuvre de modes de gestion des terrains agricoles et pâturages aptes à augmenter les stocks de matières nutritives dans les sols est une problématique qui est constamment évoquée. Parmi les stratégies possibles qui permettent d'améliorer les rendements de cultures est l'utilisation des engrais minéraux ou organiques. Le biochar, un matériau riche en carbone (C) produit par la pyrolyse de résidus organiques, est fréquemment utilisé comme amendement du sol pour renforcer sa fertilité et améliorer ses propriétés.

Cette étude porte sur l'évaluation de l'impact du biochar sur les propriétés physicochimiques du sol et sur la production d'une plante fourragère : le blé dur. Trois doses de biochars ont été appliquées (DO = 0 g de biochar, D1 +20g / pot et D2+60g/pot de biochar), conjuguées avec deux types de stress hydrique et salin.

Pour le stress hydrique on a appliqué quatre niveaux (S1= 100%, 80%, 40%, et 20% de la capacité au champ). Le stress salin est pratiqué en trois doses La dose SO= 0g de NaCl /l, la dose 4g de NaCl /l et 9g de NaCl /l. Les résultats montrent une augmentation dans le pH (7.77) et la CE (1369.13 μ S/cm), une amélioration dans les nitrates (7.36 mg/g de sol). Le carbone total (2.83%) et l'humidité (8.81%) du sol aussi une forte accumulation dans le calcaire actif 3.60%. La réponse de la plante au biochar était plus déterminante surtout avec la chlorophylle (3.88 μ g/g MF) et aussi la teneur relative des feuilles en eau (45.54%), Toutefois, en termes de surface des feuilles et aussi hauteur le biochar n'a pas été améliorant.

Mots clés : Biochar, blé dur, fertilité du sol, stress hydrique, stress salin.

Abstract

The implementation of agricultural land and pasture management methods capable of increasing the stocks of nutrients in the soil is a problem that is constantly raised. Among the possible strategies that can improve crop yields is the use of mineral or organic fertilizers. Biochar, a carbon-rich material (C) produced by the pyrolysis of organic residues, is frequently used as a soil amendment to boost its fertility and improve its properties.

In this study an evaluation of the impact of biochar on the physicochemical properties of the soil and on the production of a fodder plant durum wheat. Three doses of biochars were applied (DO = 0 g of biochar, D1 +20g/jar and D2+60g/jar of biochar), combined with two types of water and salt stress.

For water stress four levels were applied (S1= 100%, 80%, 40%, and 20% of field capacity). Salt stress is practiced in three doses The dose SO= 0g/l, the dose 4g/l and 9g/l. The results show an increase in pH (7.77) and EC (1369.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$), an improvement in nitrates (7.36 mg/g of soil); the total carbon (2.83%) and the humidity (8.81%) of the soil also a strong accumulation in the active limestone (3.60%). The response of the plant to biochar was more decisive especially with chlorophyll (3.88 $\mu\text{g}/\text{g}$ MF) and also the relative leaf water content (45.54%), however, in terms of leaf area and also height the biochar was not improving

Keywords: Biochar, Durum Wheat, Soil Fertility, Water Stress, Salt Stress.

ملخص

إن تطبيق أساليب إدارة الأراضي الزراعية والمراعي القادرة على زيادة مخزون العناصر الغذائية في التربة هي مشكلة تزايد باستمرار. من بين الاستراتيجيات الممكنة التي يمكن أن تحسن غلة المحاصيل استخدام الأسمدة العضوية أو المعدنية. Biochar ، مادة غنية بالكربون (C) تنتج عن الانحلال الحراري للمخلفات العضوية ، كثيراً ما تستخدم كتعديل للتربة لزيادة خصوبتها وتحسين خصائصها. في هذه الدراسة تقييم لتأثير الفحم النباتي على الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة وعلى إنتاج علف نبات القمح الصلب. تم تطبيق ثلاث جرعات من biochars (DO = 0 g من biochar من D1 + 20g / jar و D2 + 60g / jar من biochar) ، جنباً إلى جنب مع نوعين من الماء وإجهاد الملح.

تم تطبيق أربعة مستويات من الإجهاد المائي (100 = S1 ، 80 ، 40 ، 20٪ من السعة الحقلية). يمارس الإجهاد الملح على ثلاث جرعات: جرعة SO = 0 جم / لتر ، والجرعة 4 جم / لتر و 9 جم / لتر. أظهرت النتائج زيادة في الرقم الهيدروجيني (7.77) و EC (1369.13 ميكروغرام / سم) ، وتحسن في النترات (7.36 ملجم / جرام من التربة)؟ كما أن إجمالي الكربون (2.83٪) والرطوبة (8.81٪) للتربة تراكم قوي في الحجر الجيري النشط (3.60٪) ، وكانت استجابة النبات للفحم الحيوي أكثر حسماً خاصة مع الكلوروفيل (3.88 ميكروغرام / غرام MF) وكذلك محتوى الماء النسبي للأوراق (45.54٪) ، ومع ذلك ، من حيث مساحة الورقة وكذلك الارتفاع ، لم يتحسن الفحم الحيوي

• الكلمات المفتاحية

الفحم الحيوي ، القمح الصلب ، خصوبة التربة ، الإجهاد المائي ، الإجهاد الملحي.

• Liste Des abréviations

- **D0:** Sans Biochars
- **D1:** 20g de biochars
- **D2:** 60g de biochars
- **H0:** 200 ml d'eau (pas de stress)
- **H1 :** 160ml d'eau stress hydrique 1
- **H2:** 80 ml d'eau stress hydrique 2
- **H3:** 40 ml d'eau stress hydrique 3
- **S0 :** il n'y pas une stress salin
- **S1 :** 6g de sele stress salin 1
- **S2:** 9g de sele stress salin 2

• Liste des Figures

Figures	Pages
Figure 1 : Effet du traitement biochar sur le pH du sol	11
Figure 2 : Effet du stress sur le pH du sol	12
Figure 3 : L'effet interaction stress* traitement sur le p H du sol	13
Figure 4 : Effet du traitement biochar sur la conductivité électrique du sol	14
Figure 5 : Effet interaction stress * traitement sur la conductivité électrique du sol	15
Figure 6 : Effet interaction stress* traitement sur la conductivité électrique du sol	16
Figure 7 : Effet du traitement biochar sur l'humidité du sol	17
Figure 8 : Effet du stress sur l'humidité du sol	18
Figure 9 : Effet interaction stress* traitement sur l'humidité du sol	19
Figure 10 : Effet du traitement biochar sur la teneur du calcaire actif	20
Figure 11 : Effet du stress sur la teneur du calcaire actif du sol	21
Figure 12 : Effet interaction stress * traitement sur la teneur du calcaire actif du sol	22
Figure 13 : Effet du traitement biochar sur la teneur du calcaire total	23
Figure 14 : Effet du stress sur la teneur du calcaire total du sol	24
Figure 15 : Effet de l'interaction stress*traitement sur la teneur du calcaire total du sol	25
Figure 16 : Effet des biochar sur la teneur du carbone dans le sol	26
Figure 17 : Effet du stress sur la teneur du carbone du sol	27
Figure 18 : L'effet interaction stress* traitement sur la teneur du carbone dans le sol	28
Figure 19 : Effet du traitement biochar sur la teneur des nitrates du sol	29

Figure 20 : Effet du stress sur la teneur des nitrates dans le sol	30
Figure 21 : Effet de l'interaction stress * traitement sur la teneur des nitrates dans le sol	31
Figure 22 : Effet du traitement biochar sur la hauteur des plantes	32
Figure 23 : Effet du stress sur la hauteur des plantes	33
Figure 24 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la hauteur des plantes	34
Figure 25 : Effet du traitement biochar sur la surface des feuilles des plantes	35
Figure 26 : Effet du stress sur la surface des feuilles des plantes	36
Figure 27 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la surface des feuilles des plantes	37
Figure 28 : Effet du traitement biochar sur le développement de la biomasse	38
Figure 29 : Effet du stress sur la biomasse	39
Figure 30 : Effet de l'interaction stress * traitement sur le développement de la biomasse	40
Figure 31 : Effet du traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle A	41
Figure 32 : Effet du stress sur la teneur de la chlorophylle A	42
Figure 33 : Effet de l'interaction stress * traitement sur la teneur de la chlorophylle A	43
Figure 34 : Effet du traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle B	44
Figure 35 : Effet du stress sur la teneur de la chlorophylle B	45
Figure 36 : Effet de l'interaction stress*traitement sur la teneur de la chlorophylle B	46
Figure 37 : Effet du traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle A et B	47
Figure 38 : Effet du stress sur la teneur de la chlorophylle A et B	48
Figure 39 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la teneur de la chlorophylle A, B	49
Figure 40 : Effet du biochar sur la teneur relative en eau des feuilles	50
Figure 41 : Effet du stress sur la teneur relative en eau des feuilles	51
Figure 42 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la teneur relative en eau des feuilles	52

• Liste des Tableaux

TABLEU	PAGE
• Tableau A : Les caractéristiques du sol et du biochar utilisés.	4

• Table des matières

• Remerciement	
• Dédicace	
• Dédicace	
• Résumé	
• Abstract	
• ملخص	
• Liste des figures	
• Liste des tableaux	
• Table de matière	
1. Introduction	1
2. Matériels et méthodes	4
2.1. Localisation de l'essai	4
2.2. Dispositif expérimental	4
2.3. Description de l'expérimentation	5
2.4. Les paramètres physico-chimiques du sol	5
2.4.1. pH du sol	5
2.4.2 La conductivité électrique (CE)	5

2.4.3. L'humidité du sol	5
2.4.4. Le calcaire actif	6
2.4.5. Le calcaire total	6
2.4.6. Le carbone total	7
2.4.7. Dosage des nitrates	7
2.5. Les paramètres de la plante	7
2.5.1. La hauteur	7
2.5.2 La surface des feuilles	8
2.5.3. La biomasse	8
2.5.4. La teneur en pigments chlorophylliens	8
2.5.5. La teneur relative en eau	8
3. L'étude statistique	9
4. Résultats	11
4.1. Les paramètre du sol	11
4.1.1. Le Ph	11
4.1.2. La conductivité électrique	13
4.1.3. L'humidité	15
4.1.4 Le calcaire actif	16
4.1.5. Le calcaire total	19

4.1.6. Le carbone total	22
4.1.7 Les nitrate	25
4.2. Les paramètres de la plante	28
4.2.1. La hauteur	31
4.2.2 La surface des feuilles	31
4.2.3. La biomasse aérienne au stade maturité	37
4.2.4 La chlorophylle A	40
4.2.5. La chlorophylle B	43
4.2.6. La chlorophylle A et B	46
4.2.7. La teneur relative en eau	49
<ul style="list-style-type: none"> • Conclusion 	
<ul style="list-style-type: none"> • Références Bibliographique 	
<ul style="list-style-type: none"> • Annexes 	

INTRODUCTION

Introduction

En Algérie, les régions arides et semi arides se caractérisent par un sol pratiquement squelettique. La sévérité du climat dans ces régions, caractérisée par les rares précipitations et les fortes températures, associées aux surpâturages, a eu un impact très visible qui, a conduit à une diminution dans la productivité agricole. Il en résulte à cet effet, une perte dans le stock des matières minérales et organiques dans le sol qui devient infertile.

Les terres dans la région de Tébessa, qui est une région semi-aride sont confrontés à ce genre de problème, pour ces raisons les agriculteurs se penchent vers l'utilisation des engrais chimiques pour corriger la fertilité de leurs terres. Cependant, dans la majorité des cas l'achat de ces fertilisants leurs coutent très chers. Devant cette situation, le recours à l'utilisation des fientes de volaille devient une solution plus convenable qui peut remplacer les fertilisants minéraux. A savoir que, dans la région de Tébessa, la plupart des agriculteurs pratiquent l'élevage avicole. L'application des fientes dans le sol, corrige son stock en matières minérales, Elle permet d'enrichir le sol essentiellement en azote, un minéral très important dans la croissance et le développement des végétaux. Cependant, plusieurs agriculteurs ont mentionné que l'application des fientes est bénéfique surtout les premières années, car ils décèlent généralement après trois ans un effet inverse, qui se répercute négativement sur la production. Ces observations sont reliées surtout à la faible composition des fientes en matière de carbone et surtout à la forte charge en sodium (**Manya et al., 2012**) qui peut affecter négativement la production. Devant cette situation la restauration des sols par d'autres fertilisants devient une initiative primordiale.

De nombreuse études effectuées au cours de la dernière décennie sur l'utilisation des biochars comme amendement démontrent qu'il possède plusieurs avantages physicochimiques et biologiques et qui s'avère une avenue prometteuse pour une agriculture durable (**Lehmann et al., 2011**).

Les biochars sont des composés organiques, leurs amendements au sol permettent d'accroître la santé, la croissance des plantes et la productivité du sol, mais aussi il permet la séquestration du carbone dans les sols durant de nombreuses années (**Revell et al., 2012. Liu et al., 2016**).

Antal et Gronli (2003) mentionnent que le contenu en carbone dans le biochar est très élevé en comparaison à des résidus de culture ou de la litière de volaille. Selon la littérature,

Introduction

l'amendement du biochar peut améliorer les propriétés physiques du sol, telles que la porosité, la capacité de rétention en eau, la stabilité et la formation des agrégats (**Ding et al., 2010**).

Toutefois, des effets divergents ont été rapportés. Par exemple, **Watts et al., (2005)** n'ont observé aucune amélioration dans la fertilité de leur sol qui était argileux. Quant aux plantes, il est apporté que l'amendement de ce fertilisant a montré un effet bénéfique sur le développement des plantes. A titre d'exemple, **Graber et al., (2010)** ont étudié l'effet des biochars sur la tomate et le poivron. Ces auteurs ont mentionné que la croissance des tomates et le poivron a été significativement plus élevée dans les substrats amendés par le biochar en comparaison au témoin. Bien qu'un amendement de biochar puisse avoir des effets positifs, ceci peut occasionner des effets neutres et même nuisible à la croissance des plantes.

En réalité la divergence des effets de ce fertilisant dépend de sa composition, du type du sol receveur et aussi des exigences des plantes cultivées.

Sur ce contexte, dans l'objectif de bien comprendre comment les biochars agissent sur la fertilité du sol de la région de Tébessa, que cette étude est conduite. Elle vise à mettre en relief, l'effet des biochars sur les paramètres les propriétés physicochimiques du sol et sur la production du blé dur. Comprendre comment le biochar affecte la productivité du sol et aussi la croissance des plantes.

L'étude expérimentale mise en place, est faite sous serre dans des pots en plastiques. Le dispositif comporte trois niveaux d'amendement biochar (T= zéro, dose D1=20g de biochar /pot, D2= 60g de biochar /pot), chaque amendement est soumis à trois doses de stress salin (Témoin = zéro, S1= 4g /l de NaCl et S2 = 9g/l de NaCl), de même pour pratiquer un stress hydrique on a répliqué chaque traitement en quatre niveaux d'irrigations (H0= 100%, H1=80%, H2=60%, H3=20%).

On annonce par hypothèse que l'amendement du biochar sera bénéfique en termes de fertilité et production végétale. On s'attendra aussi que, l'effet du stress hydrique et salin sera moins accentué dans les pots qui ont reçu le biochar.

Ce modeste mémoire comporte trois parties

- Une Introduction
- Une partie matérielle et méthodes
- La troisième partie comporte les résultats et discussions avec la conclusion

Partie Expérimentale

2. Matériels et méthodes

2.1. Localisation de l'essai

Dans l'objectif d'étudier l'effet des biochars sur le développement du blé dur et sur les composantes de la fertilité du sol. Une expérimentation sous serre dans la faculté des sciences exactes et sciences de la nature (Université, Cheikh Larbi Tébessi, Tébessa) durant l'année 2021-2022 qui consiste à étudier l'effet d'un amendement de biochar avec des doses croissantes combinés à un traitement de déficit hydrique et salin sur les propriétés physicochimiques du sol et sur la production du blé dur

2.2. Dispositif expérimental

L'expérimentation a été faite dans des pots en plastiques semblables de 3Kg de contenance et 2 facteurs ont été pris en considération :

- 1^{er} facteur : le régime hydrique établis sur les plantes qui comporte les niveaux hydriques suivants ,100%, 80%, 40%, et 20% de la capacité au champ.
- 2^{ème} facteur : le stress salin établi en trois niveaux, SO= 0gde NaCl/l ; La dose 9g de NaCl/ l et 4g de NaCl/l
- 3^{ème} facteur : l'amendement (Biochars) appliqué en 3 doses (D0= sans biochars c'est le témoin, D1= 20gde biochars /pot, D2= 60gde biochar /pot.

2.3. Description de l'expérimentation

Les pots ont été remplis avec du sol de la région. Le sol et le biochars ont été soumis à une analyse chimique préalable pour déterminer les caractéristiques chimiques et physiques qui figurent dans le Tableau A

Tableau A : Les caractéristiques du sol et du biochar utilisés.

Les paramètres testés	SOL	BIOCHAR
pH	7.17±0.30	8.7 9.8 8.4
CE µS/cm	583±116.76	1320 ±192.87

Partie Expérimentale

Calcaire actif %	-	4.66 ±0.45
Calcaire Total %	-	14.34±1.87
Carbone total %	0.9%	7.88±0.25

Le semis a été réalisé à la date du 12-12 -2021 dans chaque pot on a mis 07 grains, bien arrosés, les pots sont placés dans la serre, l'apport des biochars a été fait la même date. Les grains de blé dur (*Triticum Durum*) sont rapportés de l'OAIC de Tébessa. Il s'agit de la variété Vitron.

Le biochar a été bien broyé chez un agriculteur en une poudre très fine avant qu'il ne soit amendé dans les pots. Le suivi de l'irrigation a été mené en prenant en compte la capacité aux champs du sol (déterminée au début de l'expérimentation) l'application du stress hydrique conjugué avec le stress salin selon les niveaux déjà cités a été établie après une période de 30 jours, période qui correspond à la phase (4) feuilles.

2.4. Les paramètres physico-chimiques du sol

2.4.1. pH du sol (Pielain et Mathieu, 2003)

Après agitation de 20g de sol dans 50ml d'eau distillée, la lecture du pH est faite directement sur le filtrat en utilisant un pH-mètre.

2.4.2 La conductivité électrique (CE) (Pielain et Mathieu, 2003)

- 10 g de sol fin est agité dans 50 ml d'eau distillée pour une durée de 1h et 30 mn.
- Après filtration la conductivité est déterminée à l'aide de conductimètre

2.4.3. L'humidité du sol (Baize et Jabiol, 1995)

Un échantillon de terre (x g) est mis dans l'étuve pour séchage jusqu'à avoir un poids constant. La différence de poids avant et après séchage correspond à la quantité d'eau contenue dans le sol. L'humidité est déduite à partir de la formule suivante :

$$\text{Humidité (\%)} = \frac{\text{Poids du sol avant séchage} - \text{poids du sol après séchage}}{\text{Poids sec du sol}} \times 100.$$

Partie Expérimentale

2.4.4. Le calcaire actif (Baize, 2000)

2g de terre sont agités dans l'oxalate pour une durée de deux heures. Le filtrat est chauffé en présence de l'acide sulfurique à une température de 60°C. Après refroidissement on établit une titration avec le permanganate de potassium (0.2 N) jusqu' à l'obtention d'une couleur rose très persistante. On refait les mêmes étapes pour le témoin sans sol.

Le calcaire actif est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Calcaire actif\%} = V - V' \times 0.05 \times 100 / 0.2$$

X = volume de titration du témoin

X ' = volume de titration de l'échantillon

2.4.5. Le calcaire total (Baize, 2000)

Le calcaire total est l'ensemble du calcaire du sol représenté dans toutes les dimensions (toutes les tailles), sa quantité dans le sol peut être déterminée après sa dissolution par un acide moyennement concentré (Teste d'effervescence).

On attaque le carbone de calcaire qui se présente au niveau du sol par L'**HCl**., ce dosage est basé sur la réaction acide-base avec L'**HCl** diluée au 1/3. Le volume du **CO2** dégagé permet de déterminer la quantité de **CaCO3**.



Dans un bécher contenant 10 ml de **HCL** dilué au (1/3) de poids connu (**P1**) on ajoute 2g de terre fine, on agite, on laisse reposer, on pèse à nouveau pour avoir le poids (**P2**)

Le volume du **CO2** dégagé (**P0**) permet de déterminer la quantité de **CaCo3**.

Le calcaire est calculé selon la formule suivante :

$$\text{Poids du CO}_2 \text{ dégagé} = \text{P1} - \text{P2}$$

$$\text{CaCo}_3 \text{ \%} = \text{poids du CO}_2 \text{ dégagé} * 2,274 * 100 / \text{poids du}$$

Partie Expérimentale

2.4.6. Le carbone total (Walkley-Black,1934) in (Pieltain et Mathieu ,2003)

Le carbone organique de chaque échantillon est oxydé avec le bichromate de potassium (en milieu acide). L'excès de bichromate non réduit par le carbone organique est alors titré par une solution réductrice de sels de Mohr (le sulfate ferreux). Ce titrage se fait en présence d'un indicateur coloré, la diphénylamine qui vire au vert foncé; lorsque l'excès de bichromate est réduit

Le taux de carbone est calculé selon la formule :

$$C\% = \frac{X-X'}{P} \times 0.3 \times 100$$

X = Le volume de titration du témoin en ml.

X' = Le volume de titration de l'échantillon en ml .

P = La prise d 'essai (Poids du sol).

2.4.7. Dosage des nitrates (Rodier et al . ; 1986)

Chaque échantillon (10g) de sol est agité dans 100 ml d'eau distillée pendant 1h. Après à 10 ml du filtrat on ajoute 1 ml de salicylate de sodium. On passe le contenu pour évaporation à sec dans l'étuve portée à 75-80C°. Après refroidissement, on reprend le résidu par 2ml d'acide sulfurique et 15 ml d'une solution d'hydroxyde de sodium et tartrate double de sodium et de potassium. Une couleur jaune se développe.

La lecture des échantillons est faite à la longueur d'onde 415 nm. La teneur des nitrates est déduite par l'équation d'étalonnage suivante : $Y = x \text{ DO} + y$ ($R^2 =$)(Annexe).

2.5. Les paramètres de la plante

2.5.1. La hauteur

Le prélèvement de la hauteur est établi au stade montaison. En utilisant une longue règle la hauteur est prise à partir de la base de chaque plante choisie jusqu' à la partie la plus haute de la plante.

Partie Expérimentale

2.5.2 La surface des feuilles

Le calcul de la surface foliaire est fait selon la formule suivante : Longueur x largeur x 0.75 (**Breda, 1999**)

2.5.3. La biomasse

La biomasse a été effectuée au stade maturité toutes les plantes sont coupées est répartie pour chaque pot en trois répétitions (deux plantes par répétition), pesées au laboratoire avec une balance de précision

2.5.4. La teneur en pigments chlorophylliens

L'extraction de la chlorophylle a et b est réalisé selon la méthode de Burnison (1980), qui consiste à faire une macération des feuilles (100 mg) puis les mettre dans des tubes à essais avec 10 ml d'un mélange d'acétone et d'éthanol (75 % et 25%) de volume et de 80% et 40% de concentration, on laisse les tubes à l'obscurité (pour éviter l'oxydation de la chlorophylle par la lumière) dans une température ambiante pendant 48h (Figure 23), ensuite, on passe à la lecture des densités optiques des solutions avec un spectrophotomètre, à deux longueurs d'ondes : (645 pour la chlorophylle a et de 663 nm pour la chlorophylle b).

La détermination des teneurs en chlorophylle a et b est réalisé selon les formules :

- **Chl a ($\mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$) = $12,7 \times \text{DO (663)} - 2,59 \times \text{DO (645)} \times V / (1000 \times W)$.**
- **Chl b ($\mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$) = $22,9 \times \text{DO (645)} - 4,68 \times \text{DO (663)} \times V / (1000 \times W)$.**
- **Chl (a+b) ($\mu\text{g}/100 \text{ mg MF}$) = Chl a + Chl b**

V : volume solution extraite. W: le poids de matière fraîche de l'échantillon.

2.5.5. La teneur relative en eau (Barrs, 1968)

La technique consiste à déterminer le poids frais de trois feuilles prise à partie de chaque pot. Les feuilles sont mises dans de l'eau distillée pendant 24 h pour avoir le poids à la turgescence, par la suite séchées pour avoir le poids sec la TRE est calculée selon la formule suivante :

- **TRE = $\text{PF-PS} / \text{PT-PS} \times 100$**

Partie Expérimentale

- PS= poids sec, PF= poids frais, PT= poids à la turgescence

3. L'étude statistique

Les résultats obtenus sont soumis à une Anova à deux facteurs ; le premier facteur est l'effet traitement par le biochar et le deuxième facteur représente l'effet stress. Pour les paramètres qui ont montré un effet significatif un test de comparaison des moyennes est effectué en se basant sur le test de Tukey HSD.

RESULTATS

4 Résultats

4.1. Les paramètres du sol

4.1.1. Le pH

Les résultats relatifs au pH montrent un effet hautement significatif ($F=53.1$; $P<0.00001$) pour le traitement biochar et pour l'effet stress ($F=2.8$; $P=0.004$) de même pour l'interaction stress* traitement ($F= 5.2$; $P< 0.000001$). Le traitement de biochar a induit une augmentation du pH linéaire avec les doses appliquées. La valeur notée avec la dose D1 8.80 dépasse celle D2 (7.68) et enfin la dose DO avec la valeur de 7.40 (Fig .1).

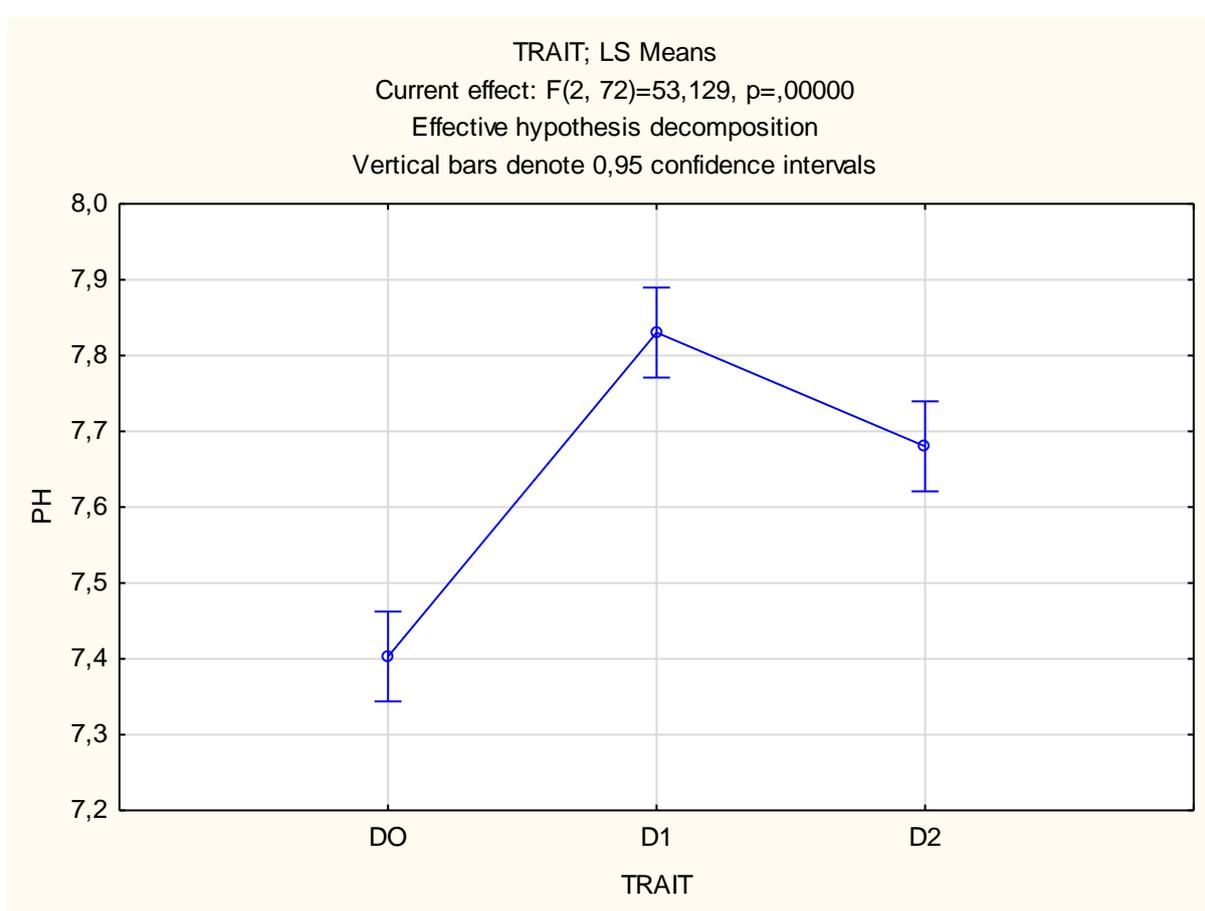


Figure 1 : Effet du traitement biochar sur le pH du sol

Résultats

Le test de Tukey HSD montre que le stress laisse voir deux groupes (Tableau 3 ; Annexe) dont la plus haute valeur est obtenue avec le niveau H3S1 (7.77) et la plus faible avec le niveau de stress H2S27.47 (Fig.2).

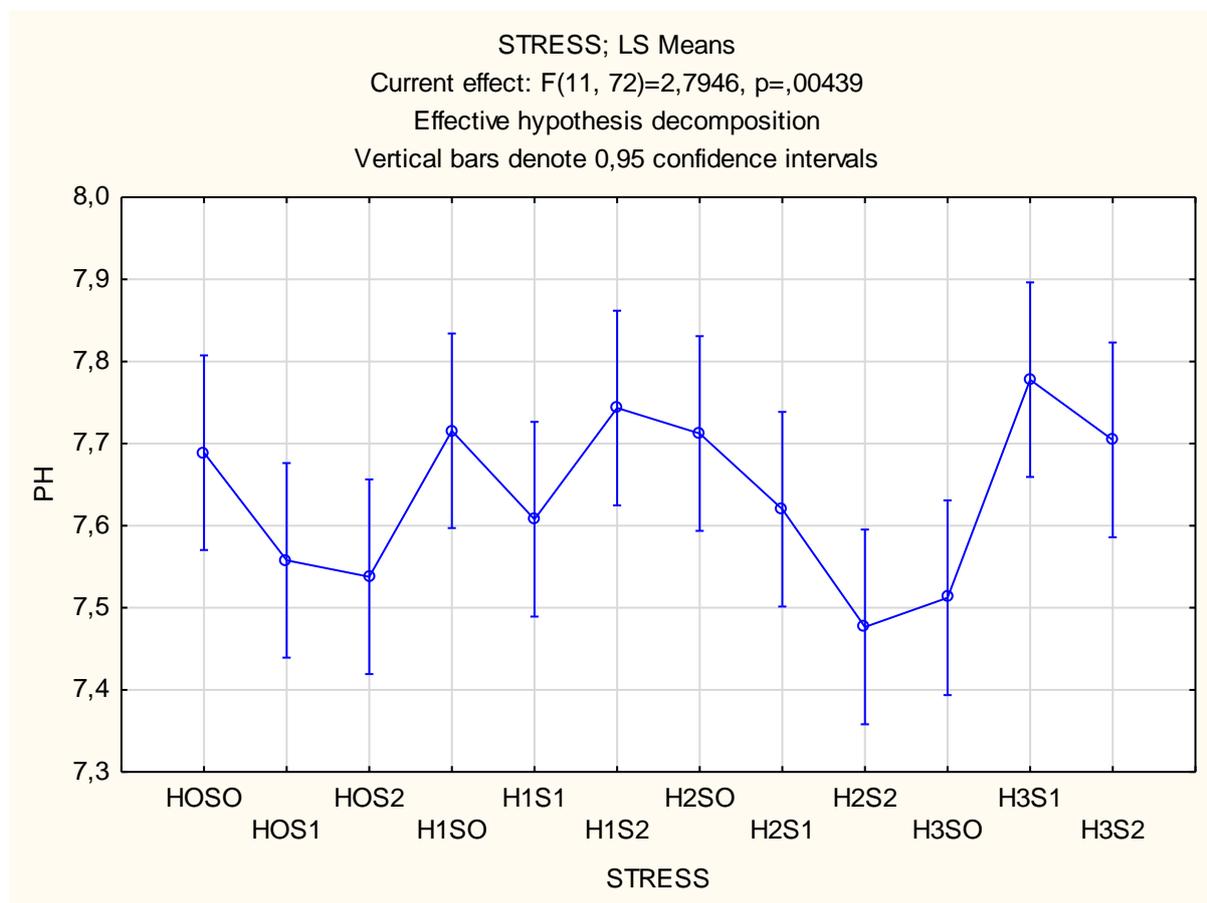


Figure 2 : Effet du stress sur le pH du sol

Il apparait aussi que l'application du stress at biochar entraine une augmentation de p H, une augmentation qui est plus visible avec la dose D1et D2 (Fig.3)

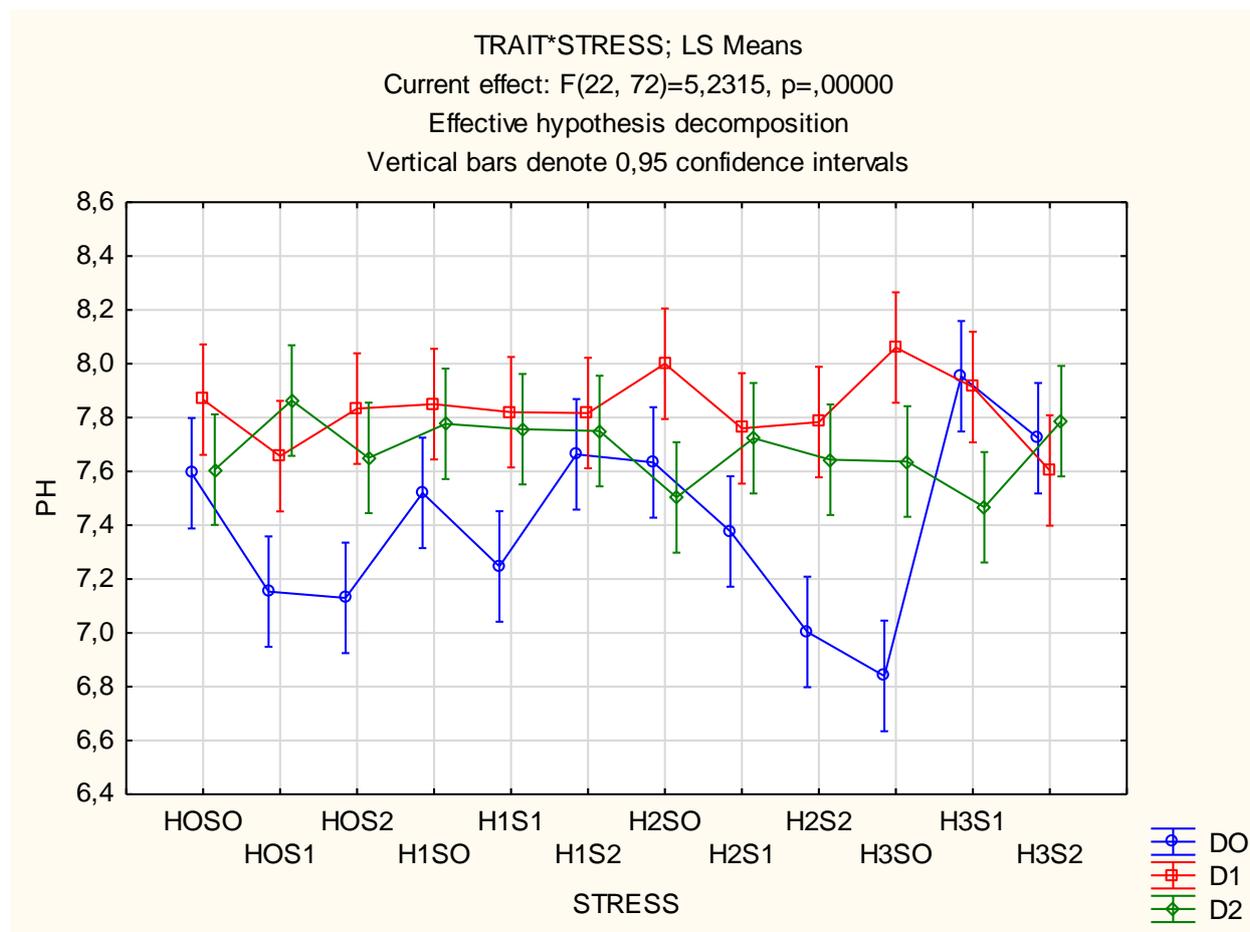


Figure 3 : L’effet interaction stress* traitement sur le p H du sol

4.1.2. La conductivité électrique

L’analyse de la variance de la conductivité électrique montre que l’apport du biochar a un effet hautement significatif ($F= 33.62 ; P<0.000001$).L’effet stress est aussi hautement significatif ($F= 106.28 ;P< 0.000001$). Pour l’interaction stress * traitement on remarque la même observation significative ($F= 36.05 ; P<0.000001$).Le biochar a impliqué une élévation dans la Conductivité électrique (CE) de la valeur 1199.16 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à la plus haute valeur 1369.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la dose D2 (Fig.4).

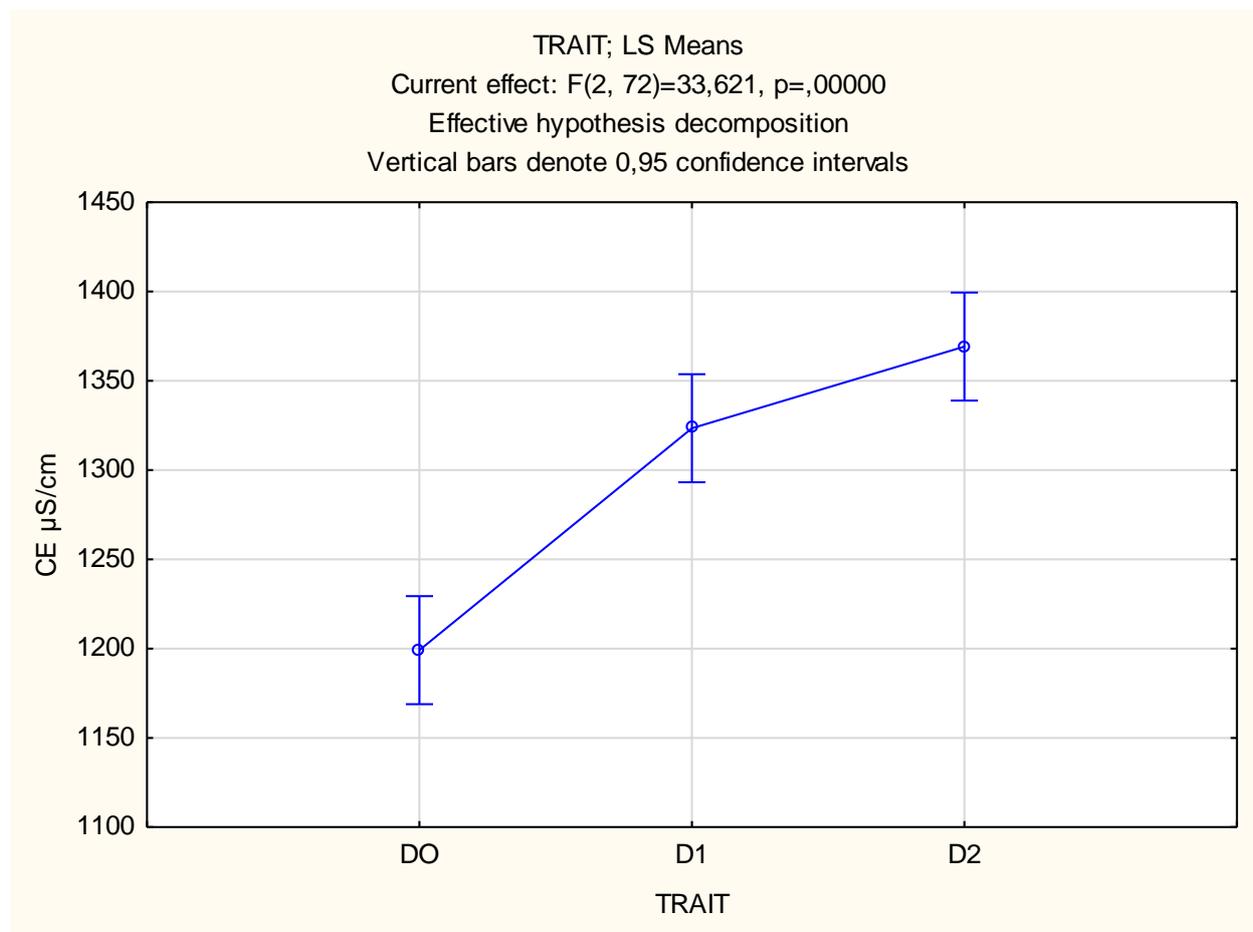


Figure 4 : Effet du traitement biochar sur la conductivité électrique du sol

L'application conjugué du stress hydrique et salin à permis une élévation dans la CE qui est très visible surtout avec les plus forts niveaux de stress conjugués salin et hydrique, en effet le test de Tukey HSD montre à cette issu cinq groupes (Tableau 6 ; Annexe) dont la plus faible CE est attribuée au niveau hydrique HOSO, H3SO, cependant lorsque le stress salin est conjugué au stress salin la CE est très élevé et ces niveaux se classent dans un groupe supérieur avec la plus haute valeur 1709.11 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour le niveau H1S2 et 1416.77 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour H3S2 (Fig.5).

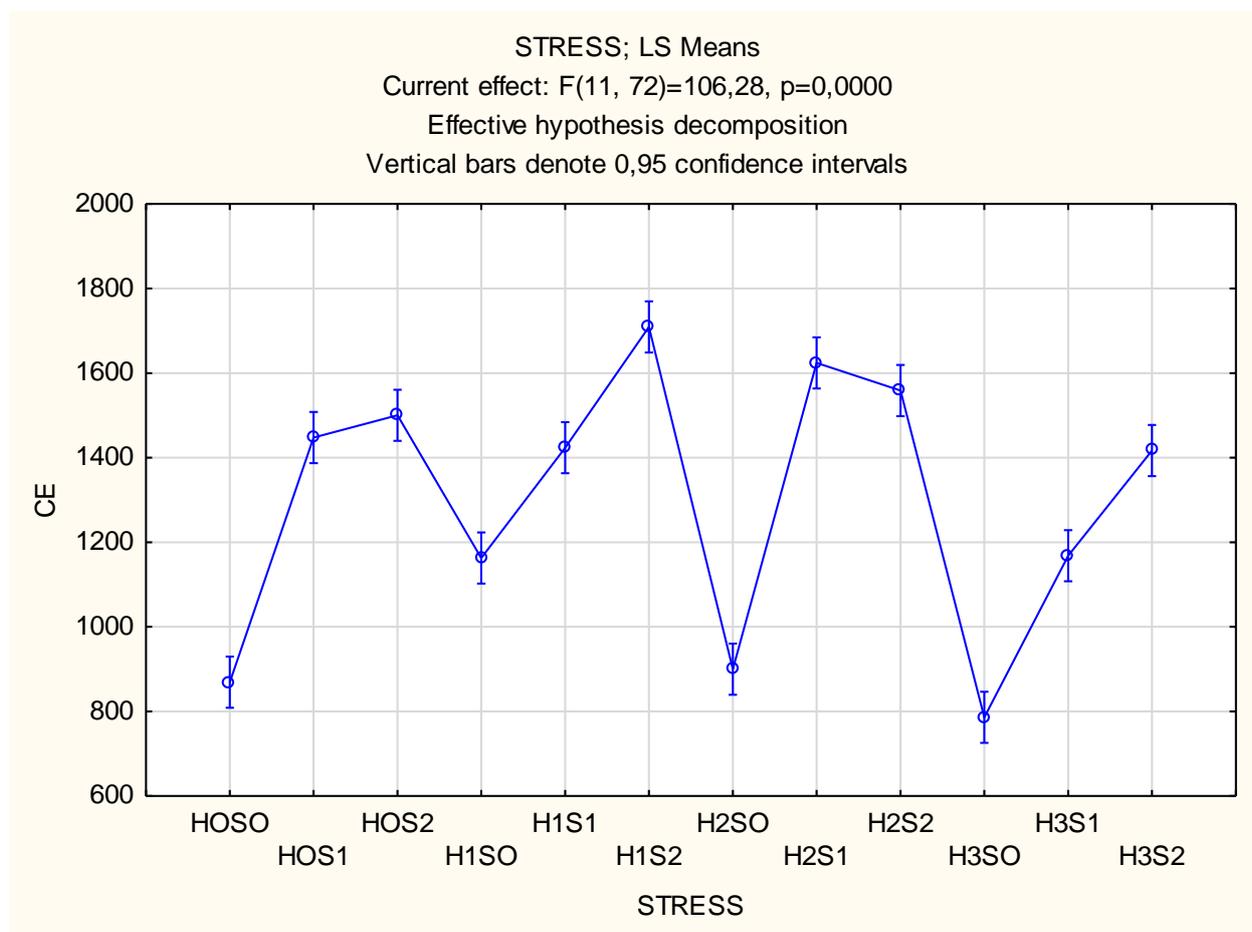


Figure 5 : Effet interaction stress * traitement sur la conductivité électrique du sol

Concernant l'interaction on remarque à travers les résultats que, plus le stress devient sévère plus la CE augmente aussi avec les doses appliquées de biochars (Fig.6).

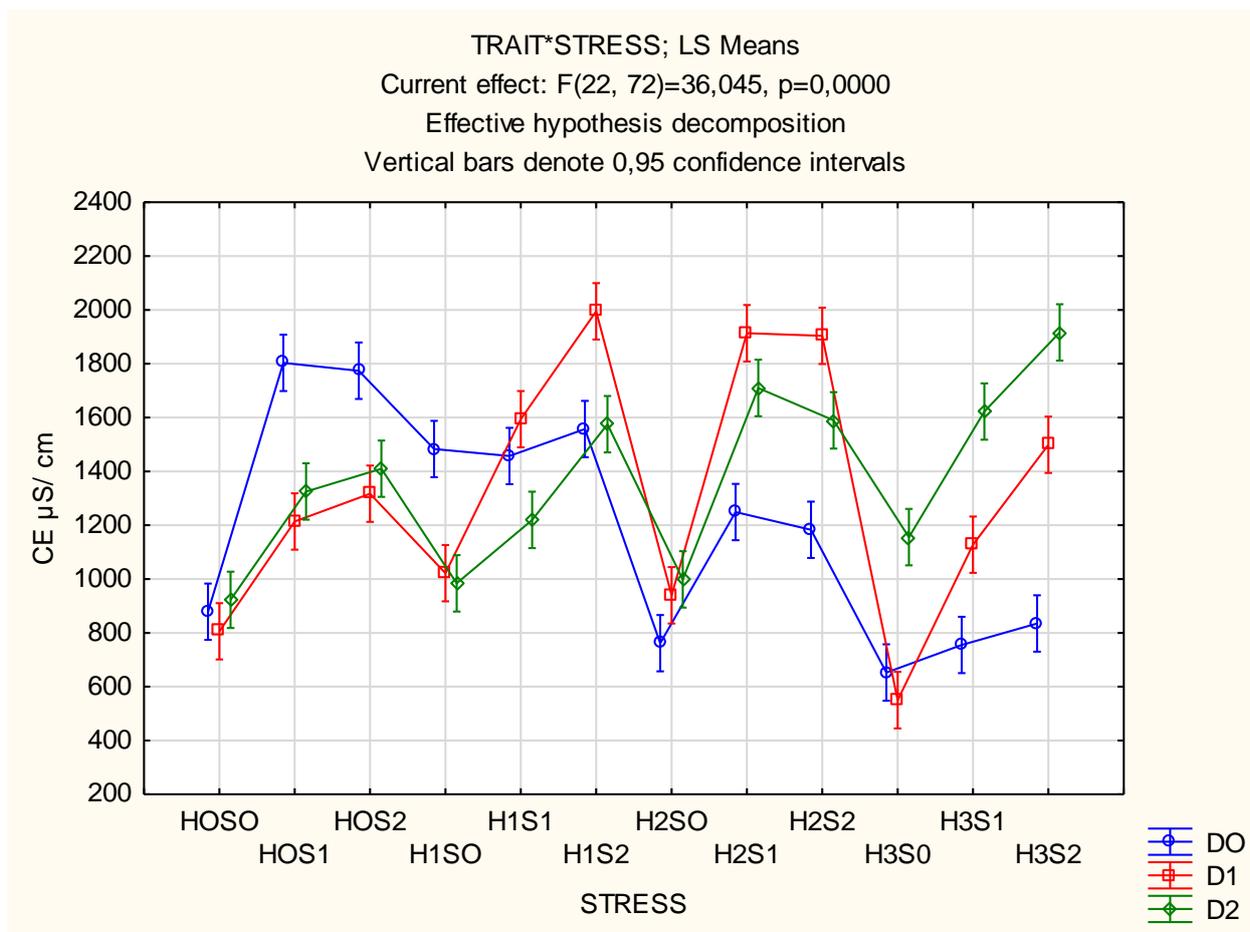


Figure 6 : Effet interaction stress* traitement sur la conductivité électrique du sol

4.1.3. L'humidité

L'étude statistique révèle un effet traitement ($F= 6.143 ; P=0.003$) significatif, quant au stress appliqué on obtient aussi un effet significatif ($F= 3.39 ; P=0.0008$). L'interaction stress* traitement est hautement significatif ($F= 3.91 ; P<0.00001$).

Les résultats obtenus montrent que l'humidité s'améliore avec les doses appliquées de biochar (Fig.7) avec la dose D1 on obtient (8.81%), D2 (8.53) et le dernier groupe DO (7.70%) (Tableau 8 ; Annexe).

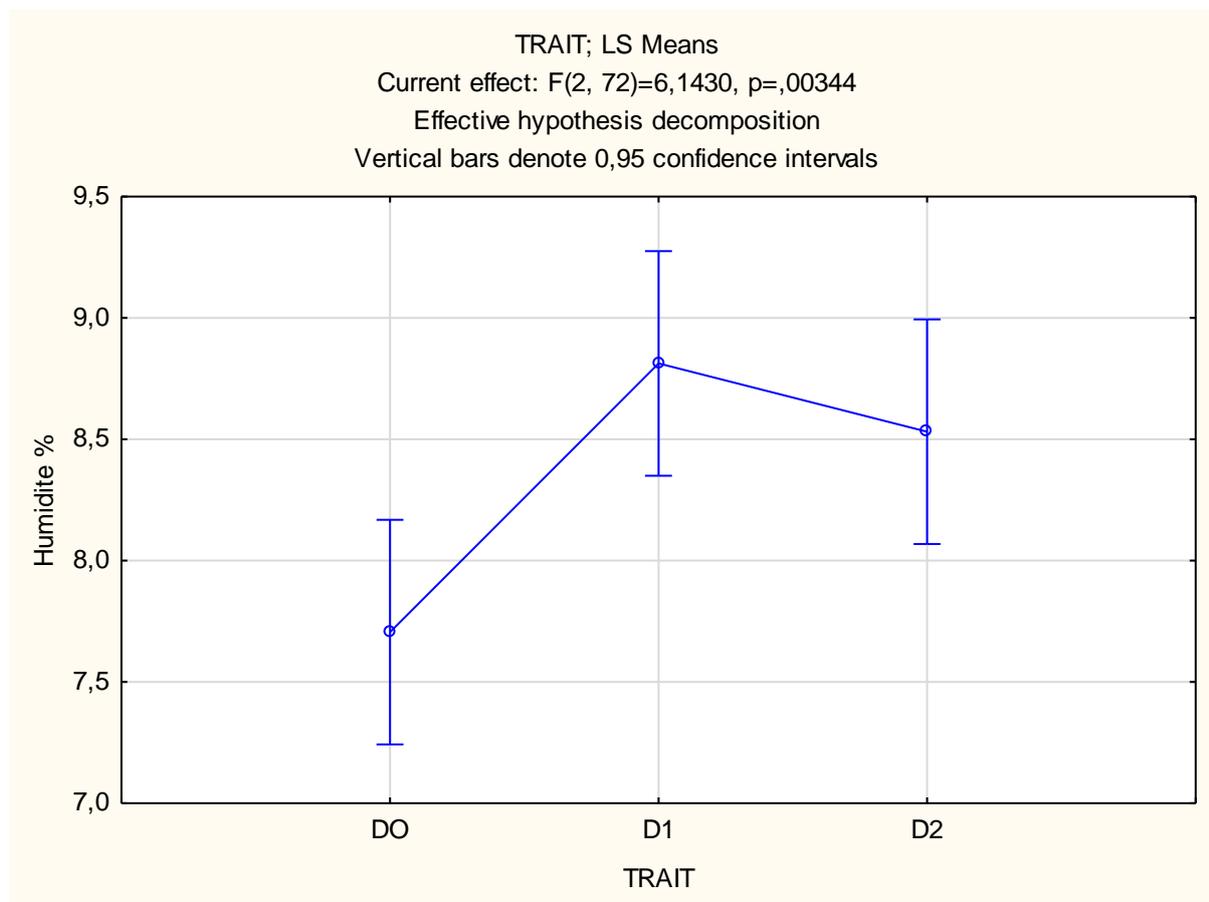


Figure 7 : Effet du traitement biochar sur l'humidité du sol

L'humidité diminue avec l'application du stress (Fig .8), en effet la plus faible humidité décelé 9.39 % est celle qui correspond avec les niveaux le plus fort niveau conjugué de stress (hydrique et salin) H3S2.

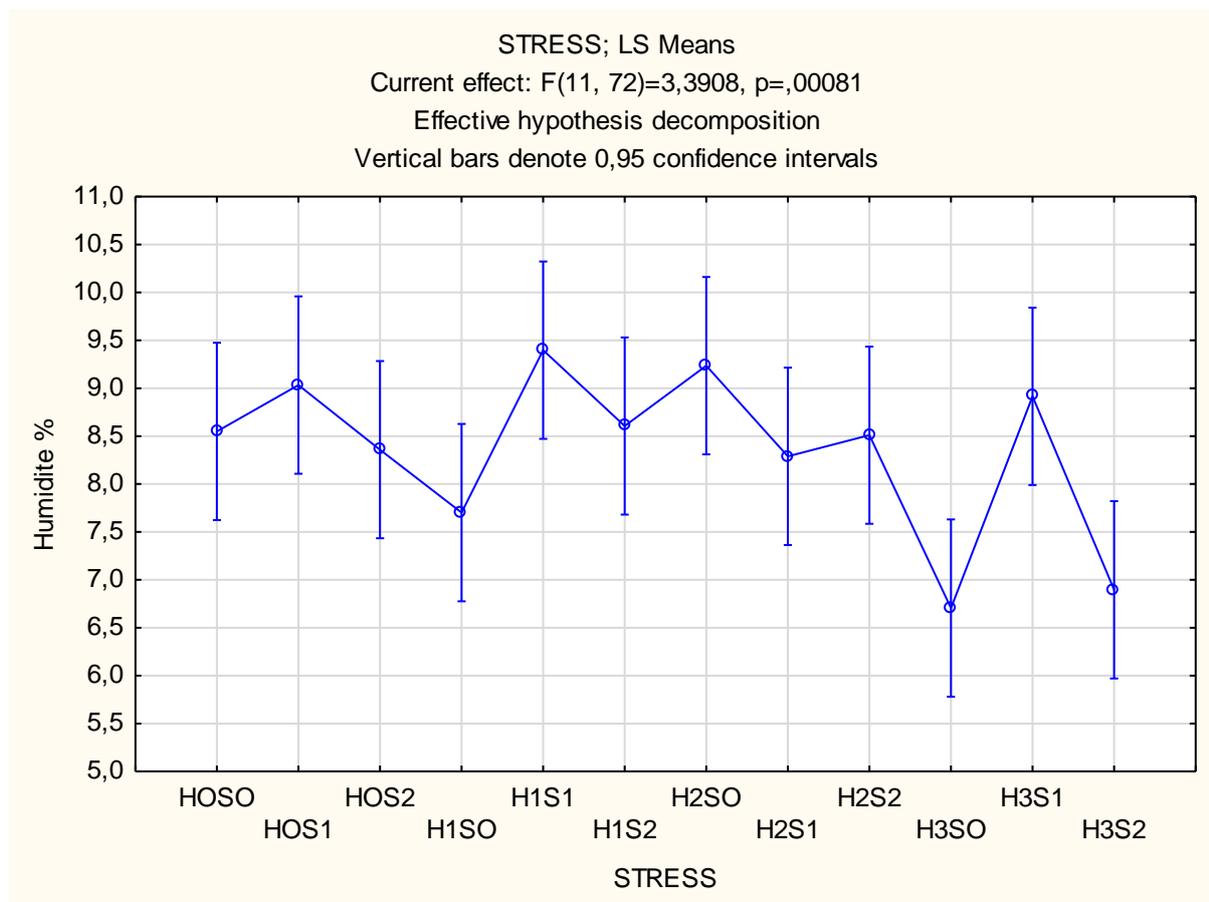


Figure 8 : Effet du stress sur l’humidité du sol

Aussi il apparaît que l’humidité augmente avec les doses de biochars conjugués avec l’augmentation des niveaux de stress appliqués (Fig.9).

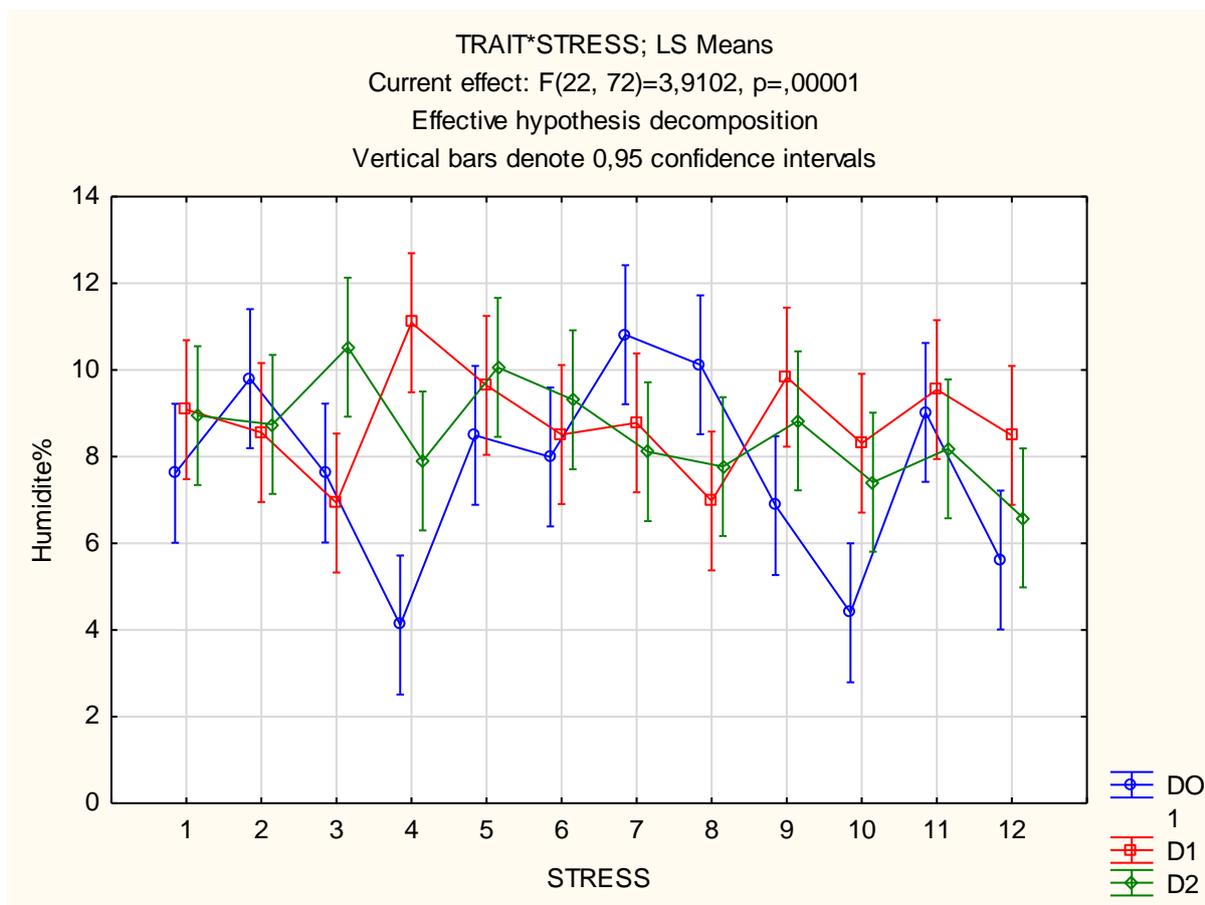


Figure 9 : Effet interaction stress* traitement sur l’humidité du sol

4.1.4 Le calcaire actif

L’analyse de la variance pour le calcaire actif indique que l’amendement du sol par le biochar a permis une augmentation significative ($F= 202.28 ; P< 0.000001$). On obtient trois groupes (Tableau 11 ; annexe) dont le premier est la dose D2 avec la plus haute valeur 3.66% suivi par le deuxième groupe D1 avec la teneur de 3.14% et enfin le dernier groupe représenté par la dose DO (le témoin) par la valeur 2.63% (Fig.10).

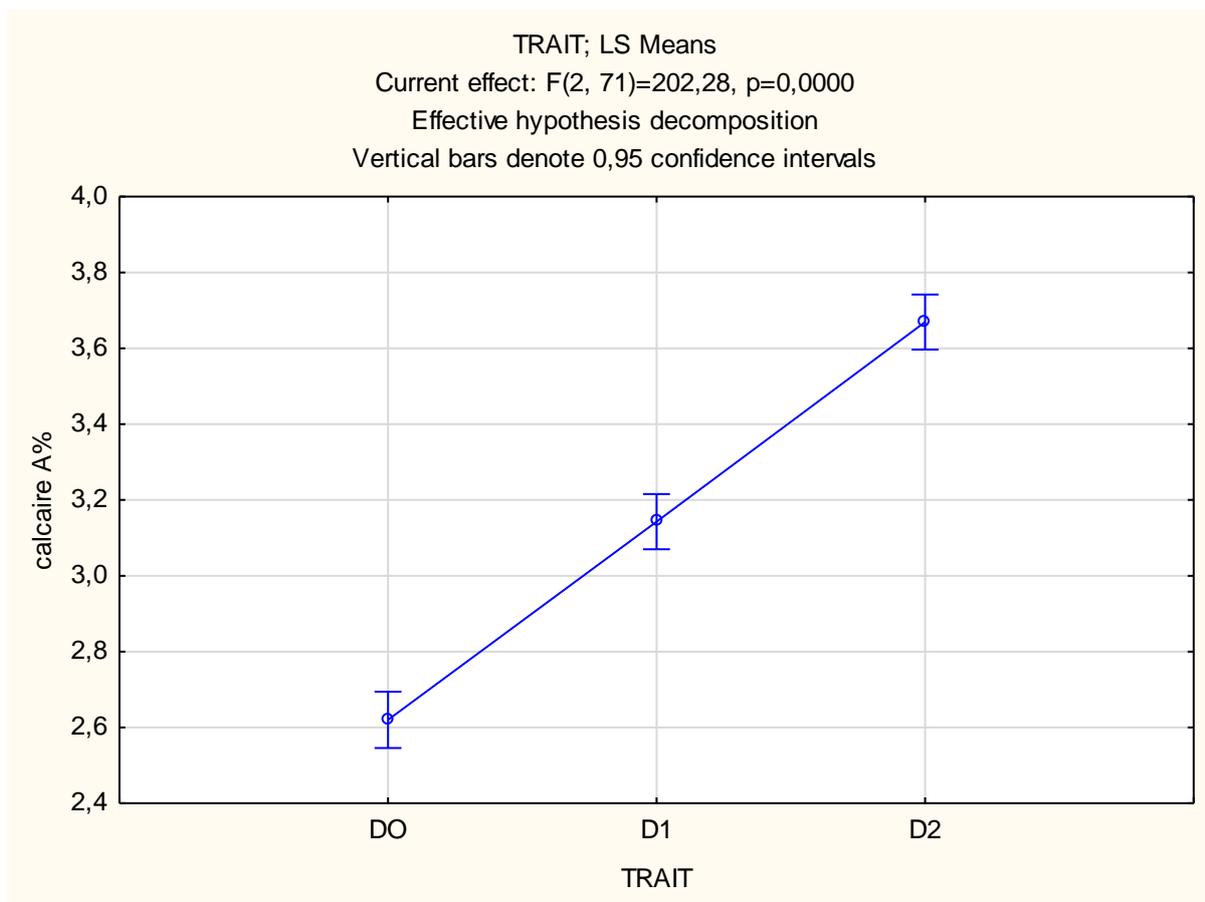


Figure 10 : Effet du traitement biochar sur la teneur du calcaire actif

Il apparait aussi selon l'étude statistique que l'effet stress est hautement significatif ($F=13.20 ; P<0.000001$) de même que pour l'effet interaction stress et traitement ($F= 6.62 ; P<0.00001$). Il ressort des résultats obtenus du stress six groupes (Tableau 12 ; annexe) la plus haute valeur de calcaire actif est décelée avec H2SO (3.60%) et la plus faible est notée avec le niveau de stress HOS1 2.88% (Fig.11).

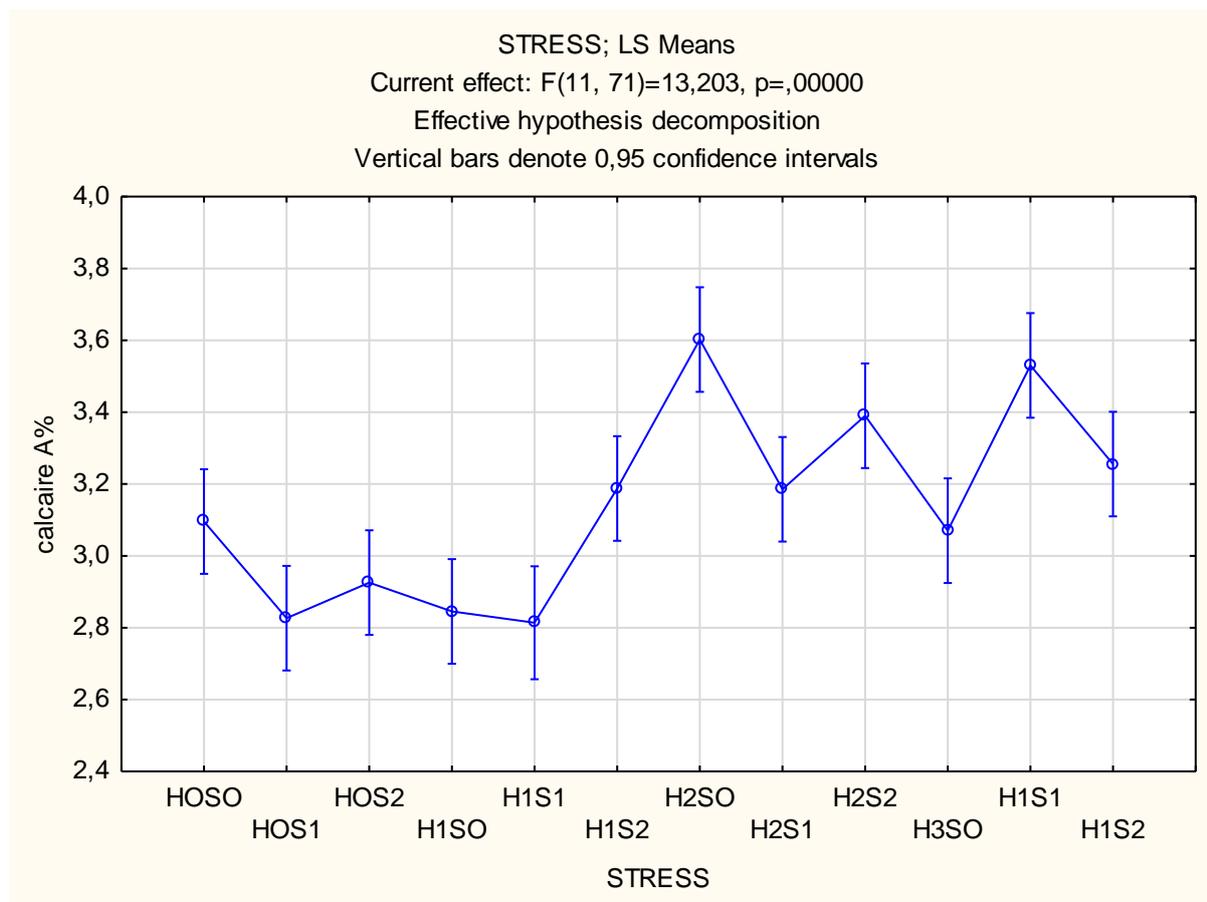


Figure 11 : Effet du stress sur la teneur du calcaire actif du sol

L'interaction entre les traitements indique que l'accumulation du calcaire actifs s'est bien déroulé avec le niveau D2 surtout avec le niveau H3S2 et H3S1 on obtient respectivement pour ces deux niveaux les valeurs 3.25%, 3.53% (Fig.12).

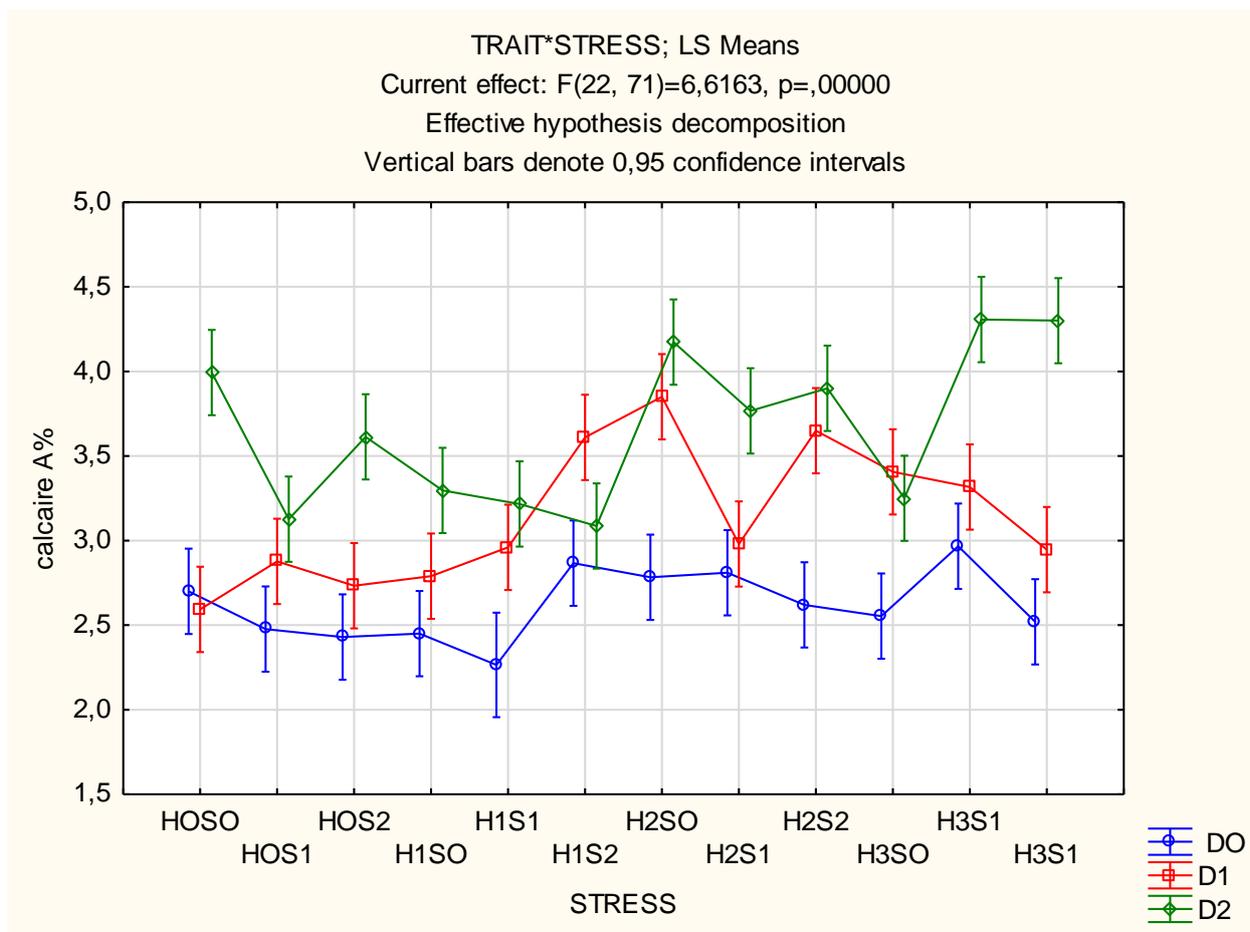


Figure 12 : Effet interaction stress * traitement sur la teneur du calcaire actif du sol

4.1.5. Le calcaire total

L'évolution du calcaire total indique un effet traitement biochar hautement significatif ($F=132.25$; $P<0.000001$). Un effet stress ($F=4.32$; $P<0.000001$) et stress * traitement ($F=5.66$; $P<0.000001$) aussi hautement significatifs. Le test de Tukey HSD montre que le traitement biochar a noté trois groupes (Tableau 14 ; Annexe). La dose DO (témoin) montre la plus haute valeur en calcaire total 15.65% suivi par D2 13.28% et enfin D1 8.77 (Fig.13).

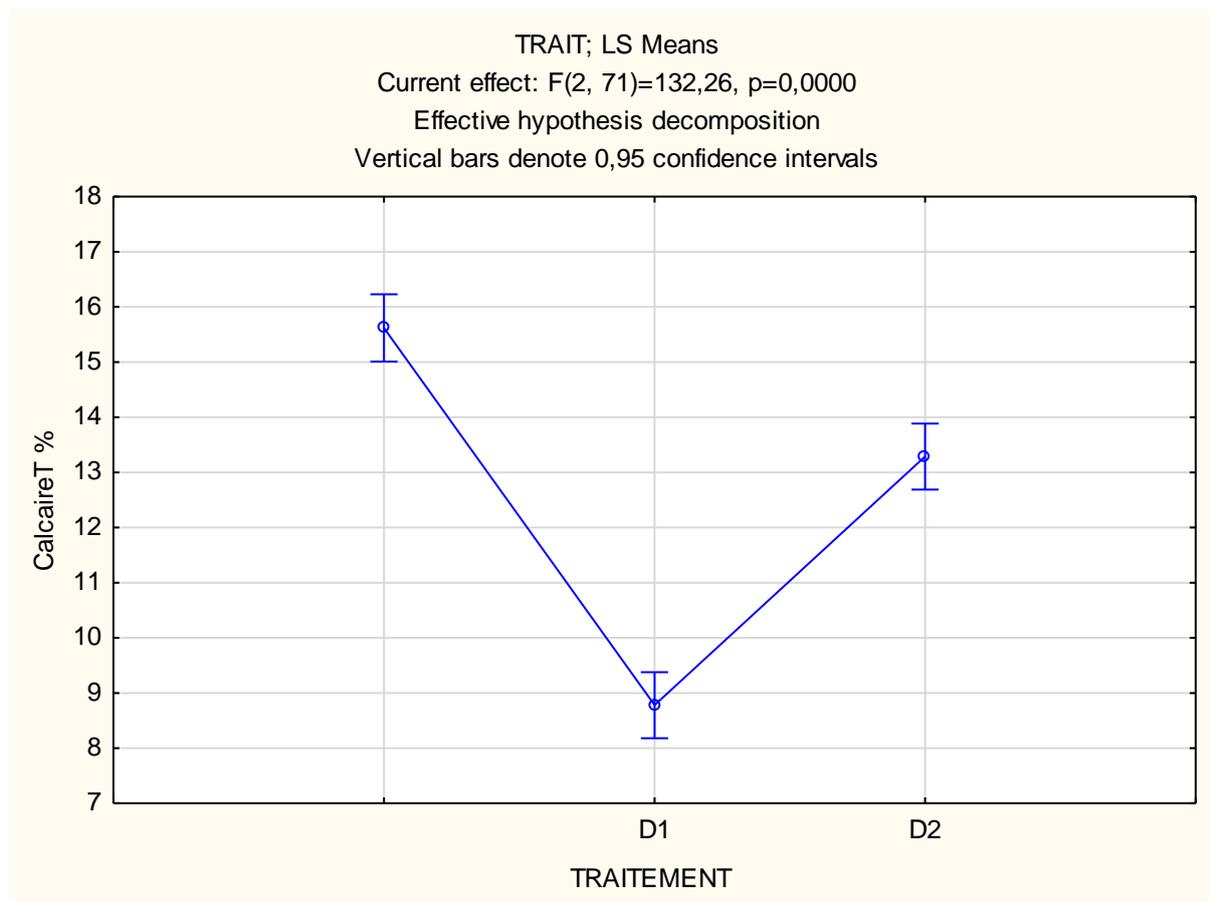


Figure 13 : Effet du traitement biochar sur la teneur du calcaire total

L'effet stress a décelé pour ce paramètre trois groupes avec la plus haute valeur en calcaire total 15.50% notée avec le niveau H2SO, alors que la plus faible teneur est allouée au niveau de stress H3S2 10.82% (Fig.14).

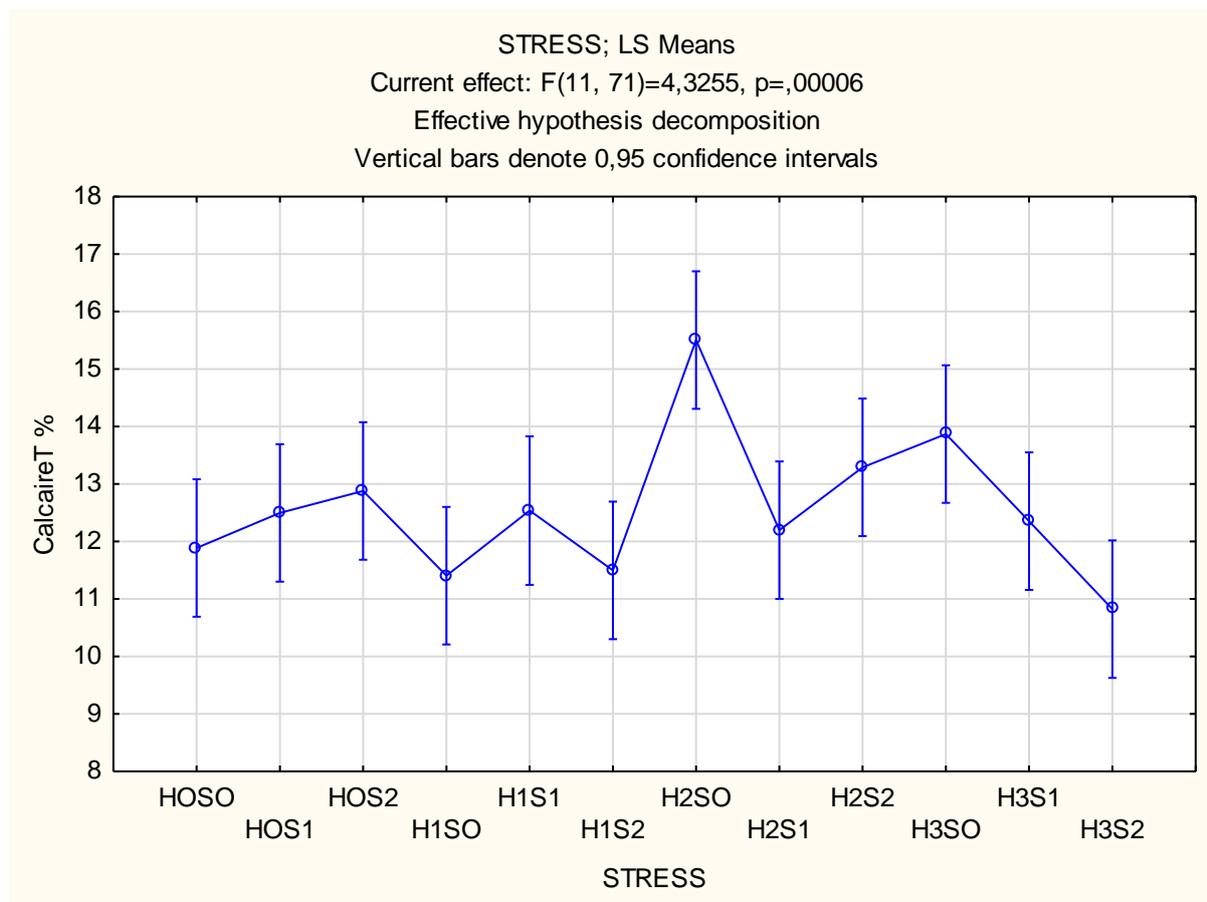


Figure 14 : Effet du stress sur la teneur du calcaire total du sol

L'interaction montre aussi que le niveau de traitement de biochar marque les plus hautes valeurs suivies par la dose D2et enfin D1. Le test de comparaison des moyennes indique à cet effet que la plus haute teneur est obtenue avec H3SO 13.86% et la plus faible avec H3S1 12.35% (Fig.15).

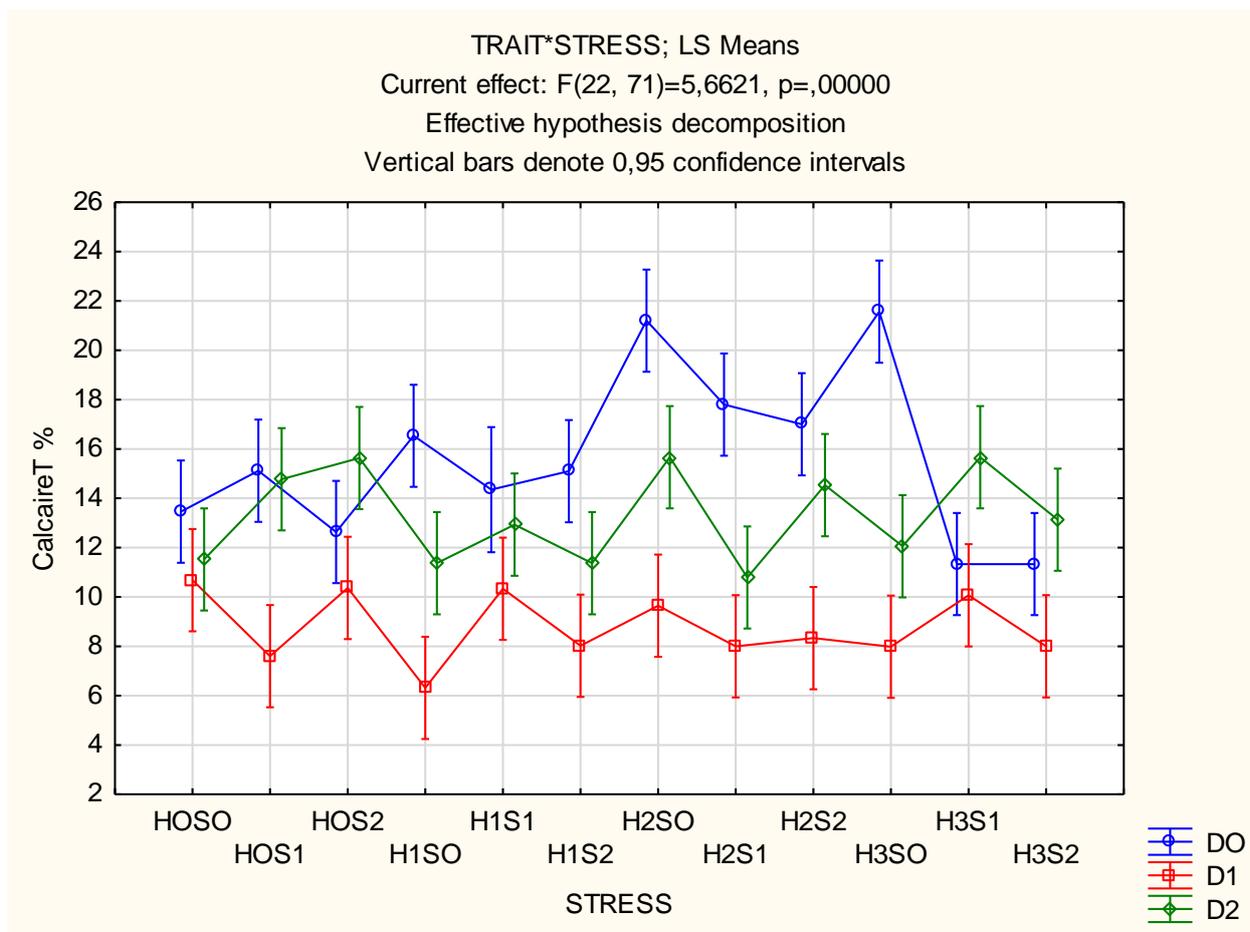


Figure 15 : Effet de l'interaction stress*traitement sur la teneur du calcaire total du sol

4.1.6. Le carbone total

L'analyse statistique du carbone indique une évolution significativement positive sous l'effet du traitement ($F=1068,33 ; P<0,000001$). L'effet stress est aussi significatif ($F=4,54 ; P<0,00003$). Concernant l'interaction stress* traitement liasse voir la même tendance ($F=4,69 ; P<0,000001$). Le test de Tuley HSD pour le traitement de biochar fait ressortir ces trois groupes $DO < D1 < D2$ (Tableau. 17 ; Annexe). Les valeurs obtenues avec DO (1,81%) celle de D2 (2,83%) (Fig.16)

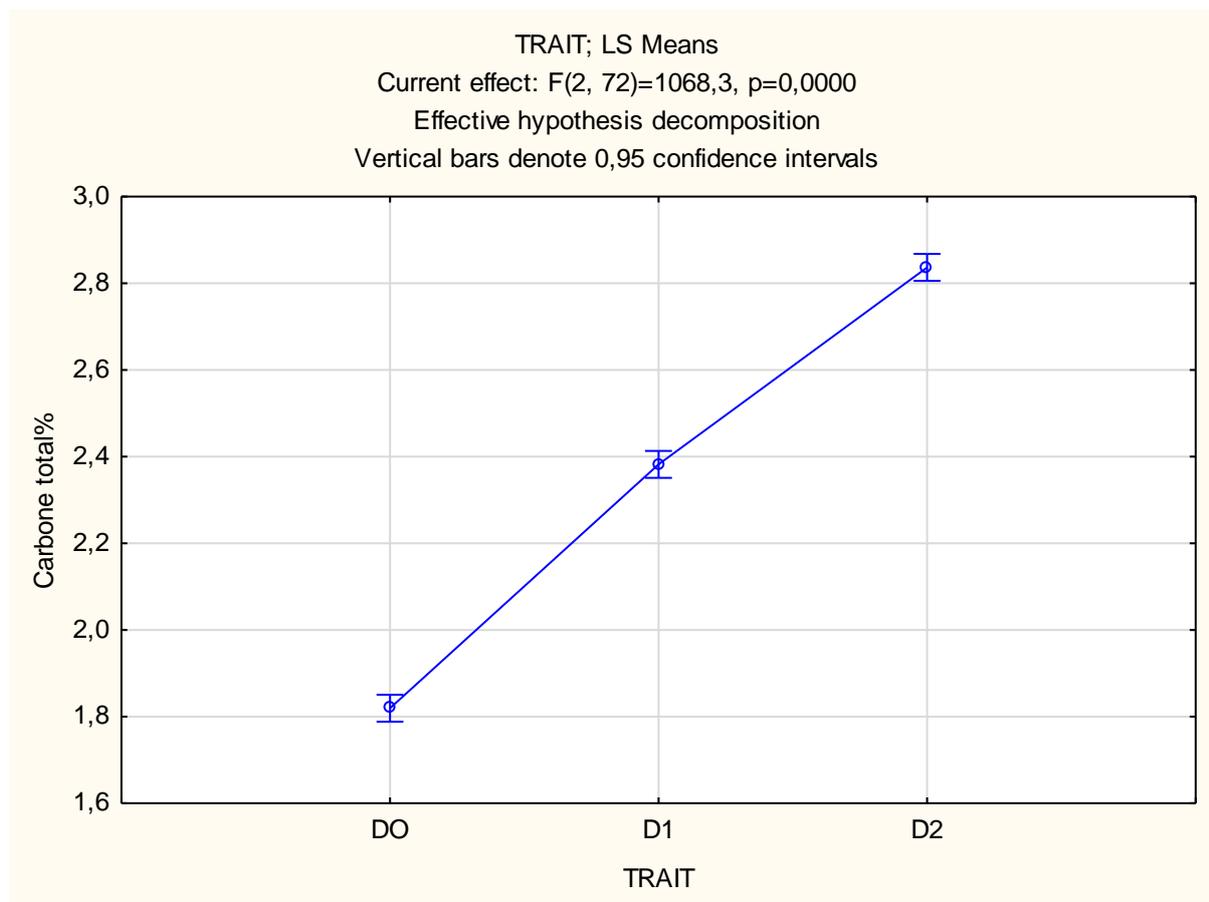


Figure 16 : Effet des biochar sur la teneur du carbone dans le sol

L'application du stress influence sur la composition du sol en carbone, le test de comparaison des moyennes met en relief trois groupes avec la plus haute valeur 2.44 % attribuée à H1S1 et la plus faible teneur 2.24 % celle du niveau H3S1 (Fig.17).

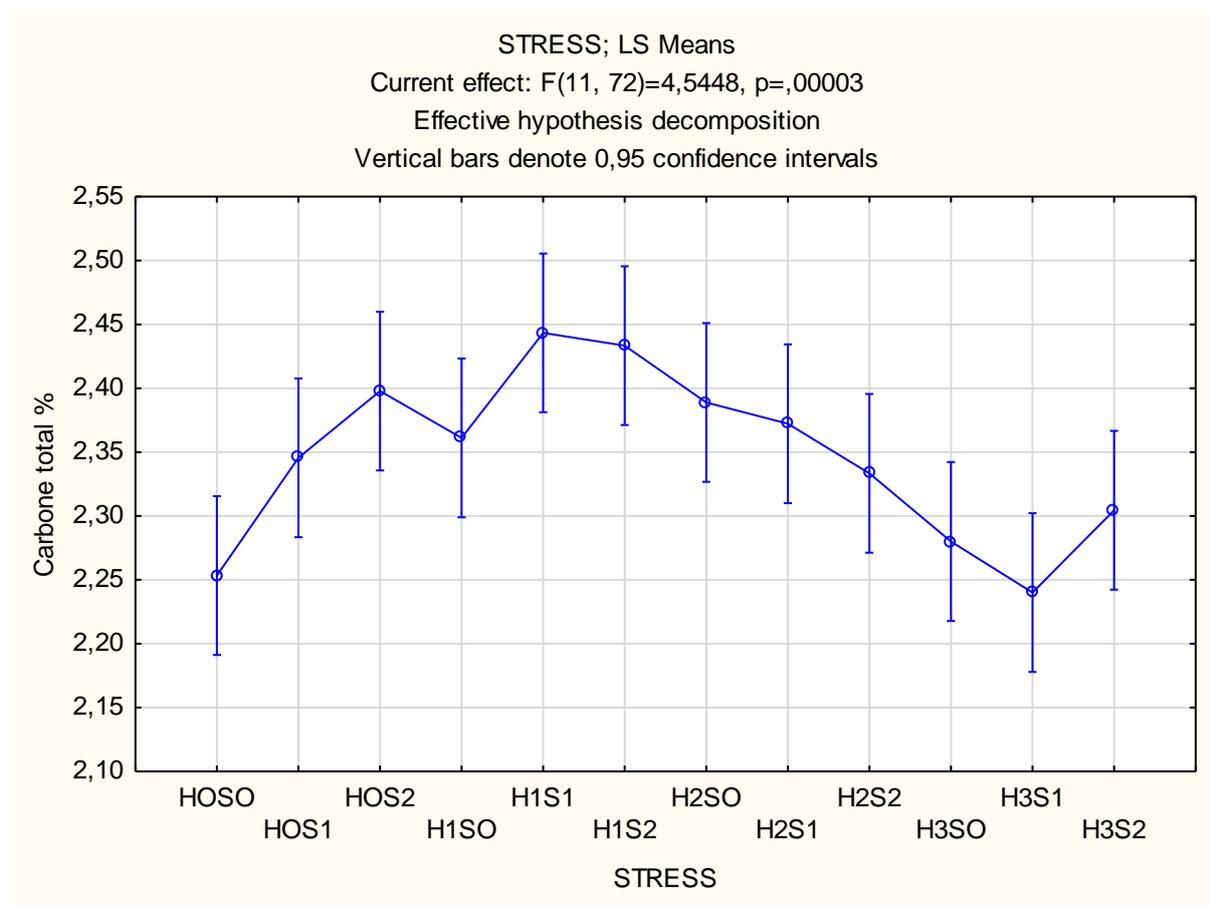


Figure 17 : Effet du stress sur la teneur du carbone du sol

Le stress associé au biochar favorise le maintien du carbone dans le sol à des teneurs supérieures à celle du sol témoin (Fig.18).

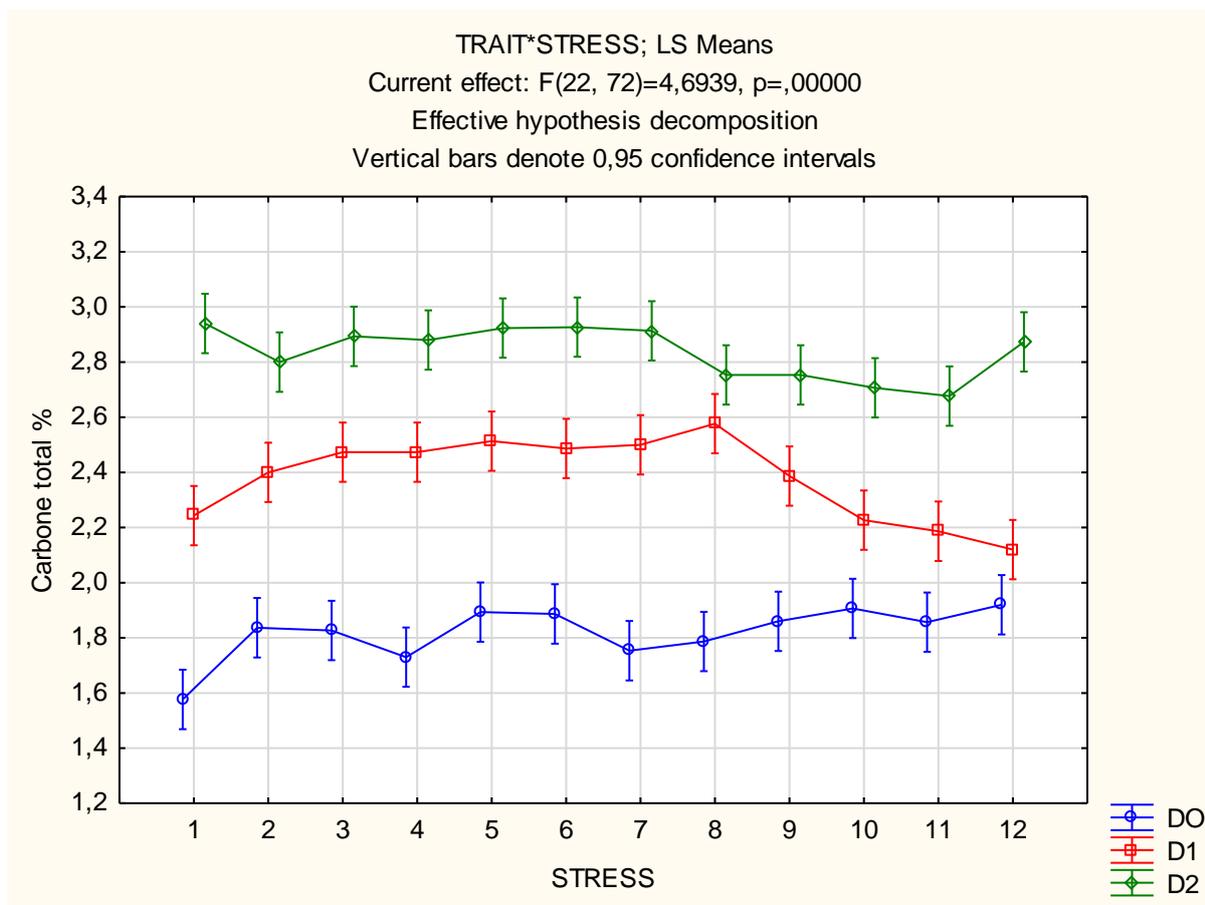


Figure 18 : L’effet interaction stress* traitement sur la teneur du carbone dans le sol

4.1.7 Les nitrates

L’Anova relative à la teneur des nitrates dans le sol montre un effet traitement hautement significatif ($F= 575.54 ; P< 0.00001$). L’application du stress a induit un effet hautement significatif ($F=5.21 ; P< 0.00001$) sur la teneur des nitrates dans le sol, de même l’interaction stress*traitement ($F= 5.18 ; P<0.00006$) est hautement significatif. Le biochar a permis une accumulation importante de nitrates dans les pots qui ont reçu la dose D1 (7.36 mg/g de sol), la dose D2 note 3.27 mg/g de sol et DO 3.14 mg/g de sol (Fig.19).

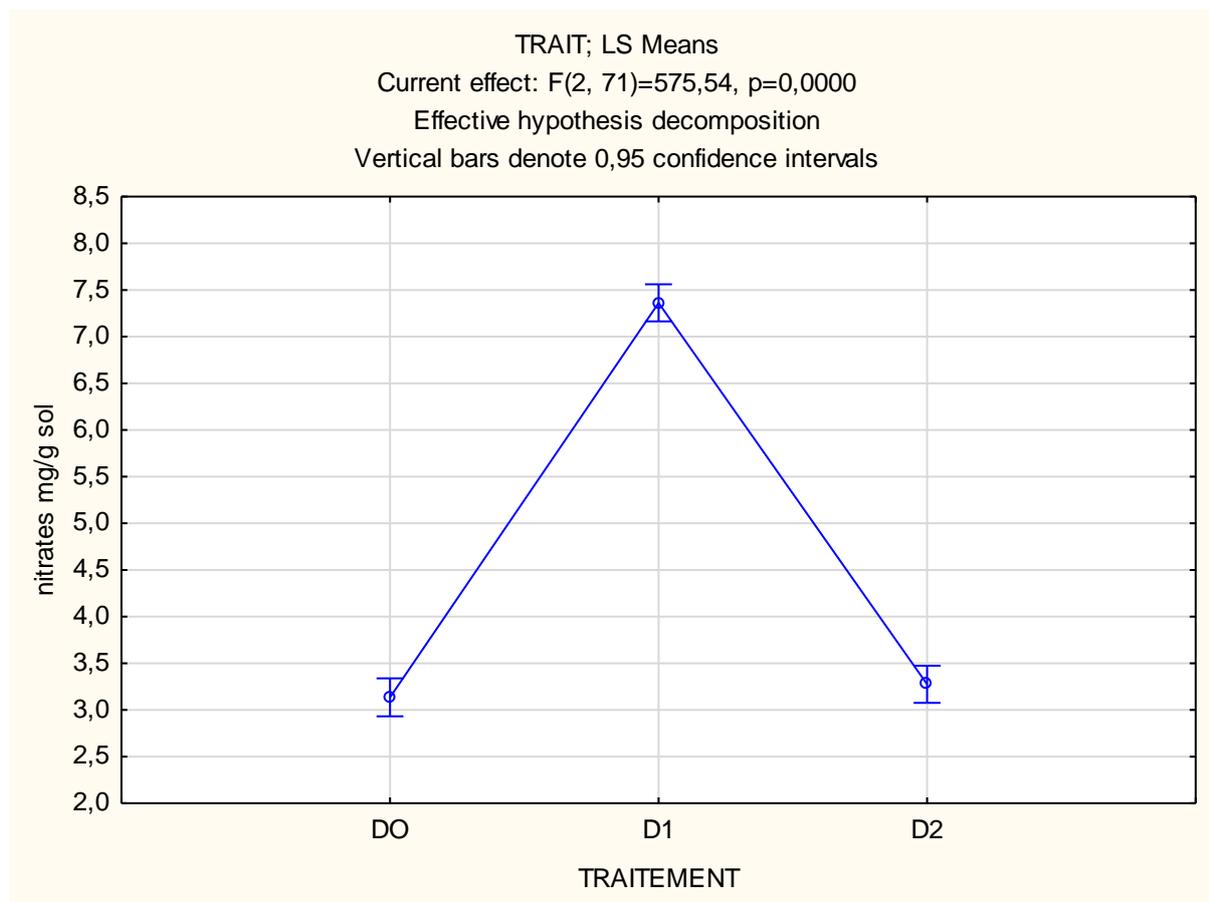


Figure 19 : Effet du traitement biochar sur la teneur des nitrates du sol

Avec le stress on observe trois groupes (Tableau 21 ; Annexe) la plus haute valeur H3SO (5.38 mg/g de sol), alors que la plus faible teneur est observée avec le niveau H2S1 (3.77 mg/g de sol) (Fig.20).

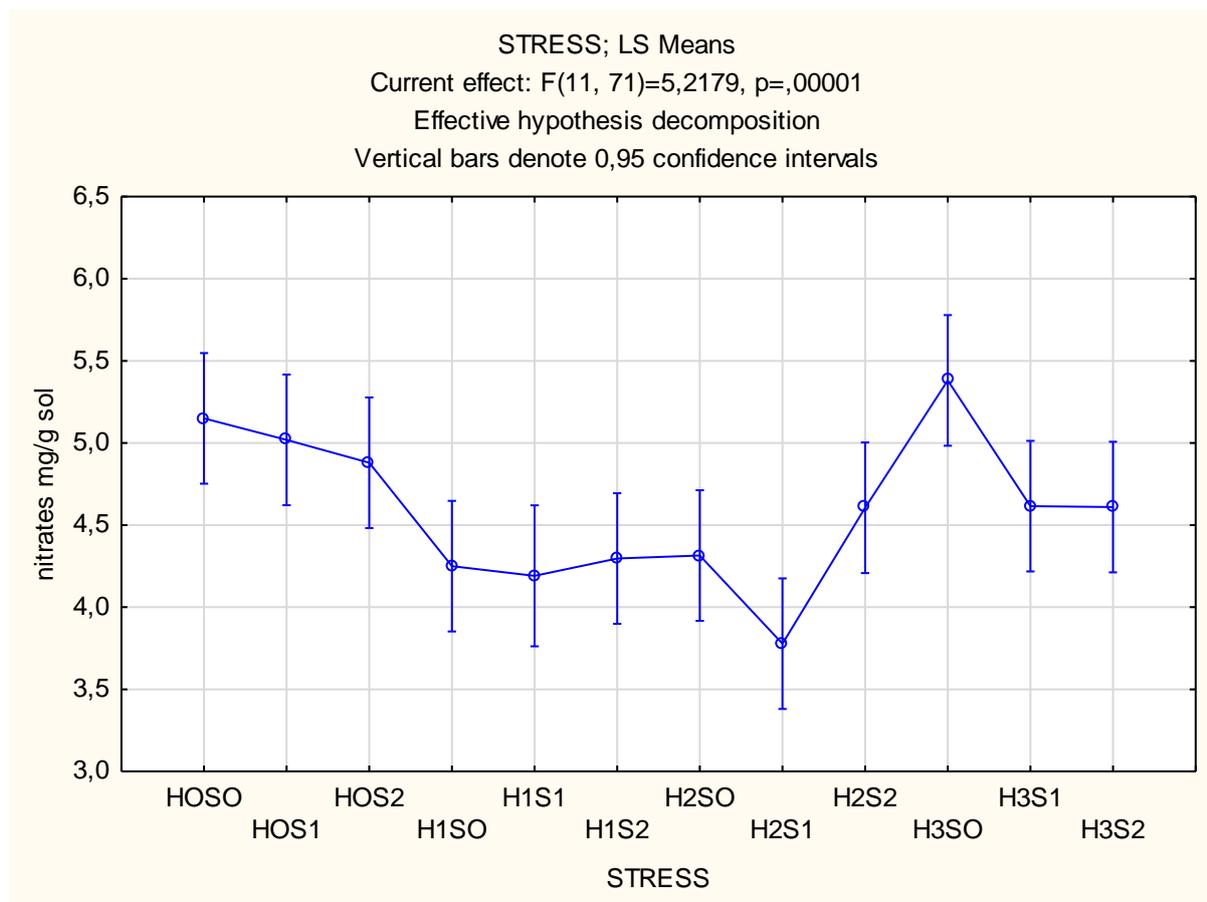


Figure 20 : Effet du stress sur la teneur des nitrates dans le sol

Avec l'interaction stress * traitement on observe que le traitement D1 note les plus hautes valeurs en comparaison avec les niveaux de stress pour le traitement D2 et DO. La plus faible teneur en nitrates est obtenue avec H2S2 4.60 mg/g de sol (Fig.21)

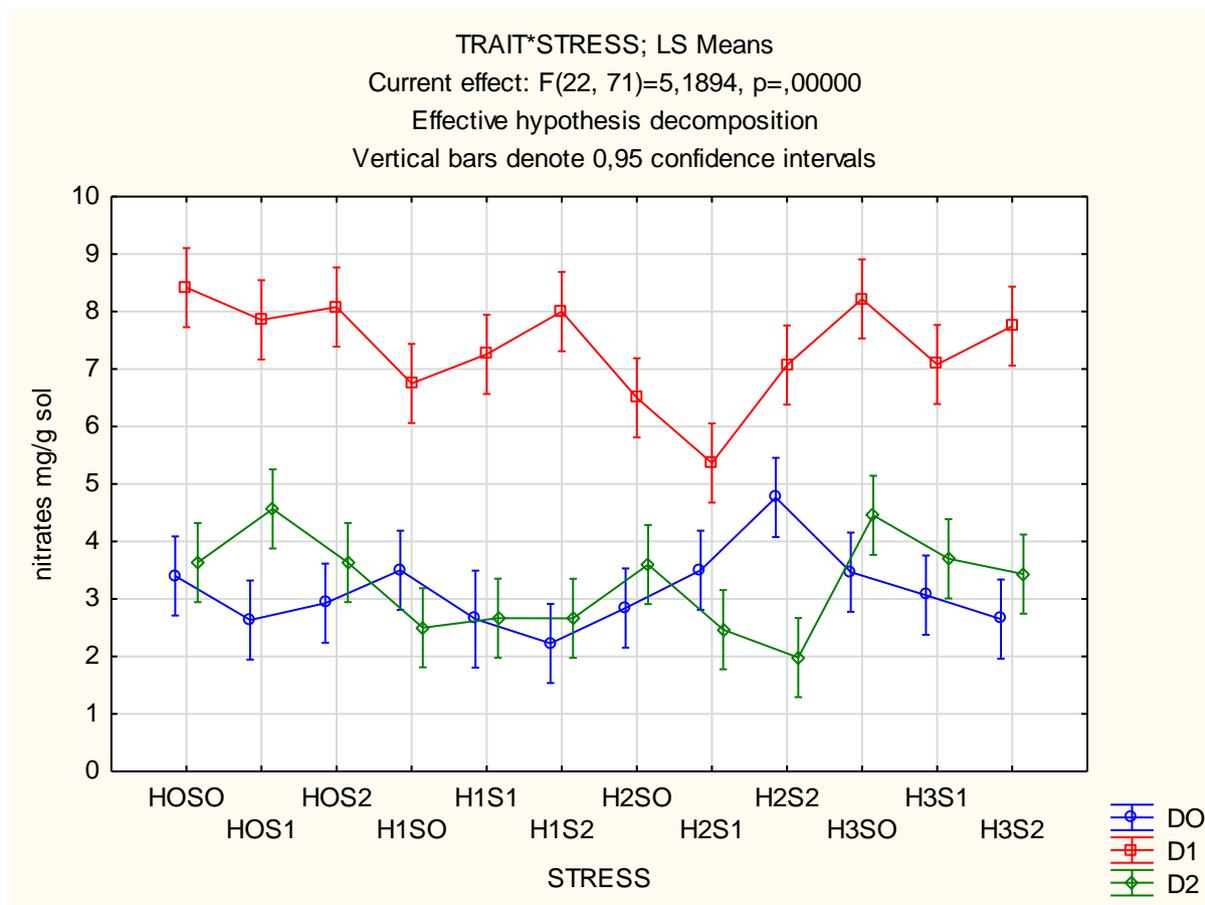


Figure : 21 Effet de l'interaction stress * traitement sur la teneur des nitrates dans le sol

4.2. Les paramètres de la plante

4.2.1. La hauteur

L'analyse de la variance ne montre aucun effet significatif ($F= 2.07 ; P=0.13$). L'effet stress et interaction stress*traitement sont significatif, les résultats indiquent respectivement ($F= 11.04 ; P<0.00001$), ($F= 2.10 ; P=0.01$). Le traitement biochar n'a pas engendré une différence entre les trois dose (Fig.22).

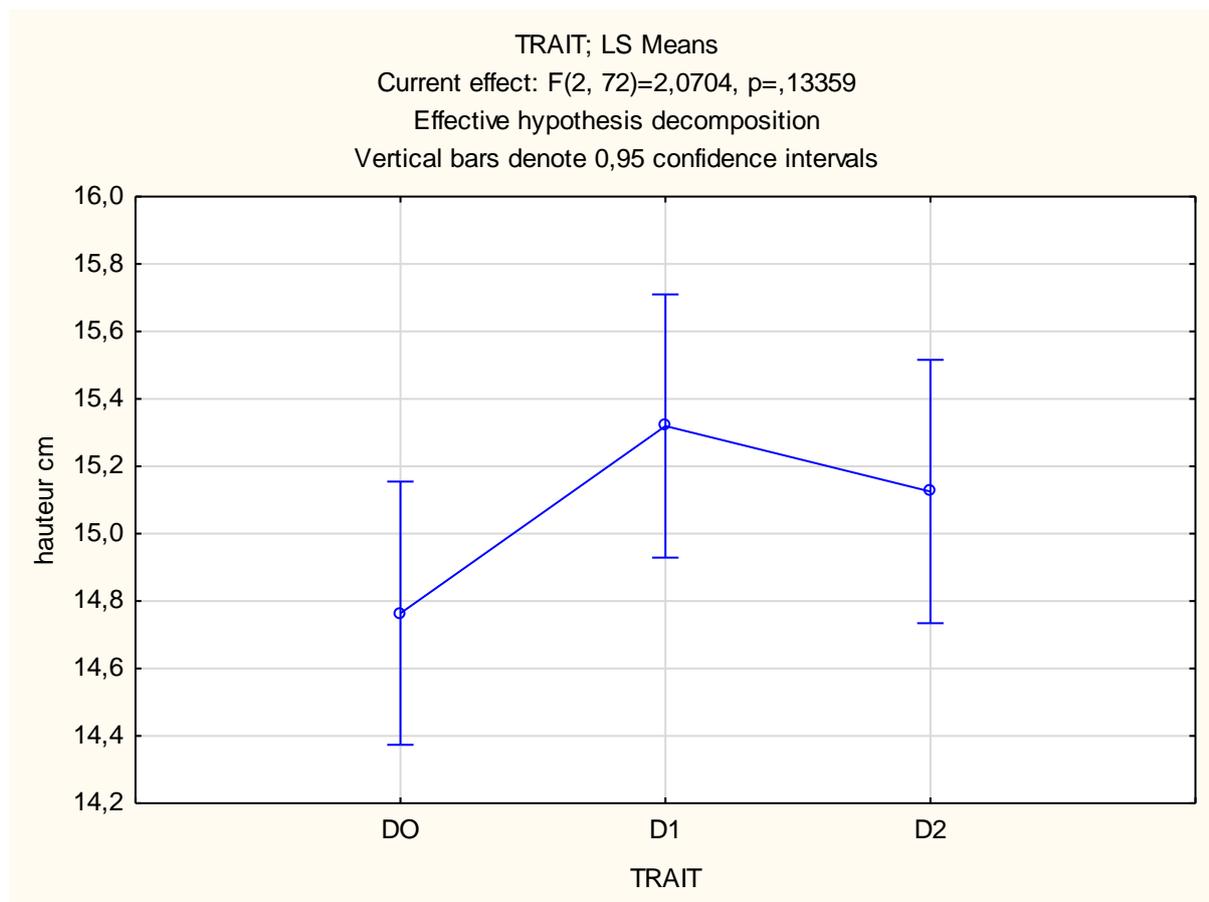


Figure 22 : Effet du traitement biochar sur la hauteur des plantes

L'application du stress a induit une diminution avec tous les niveaux de stress en comparaison avec les plantes témoins HOSO (Fig.23).

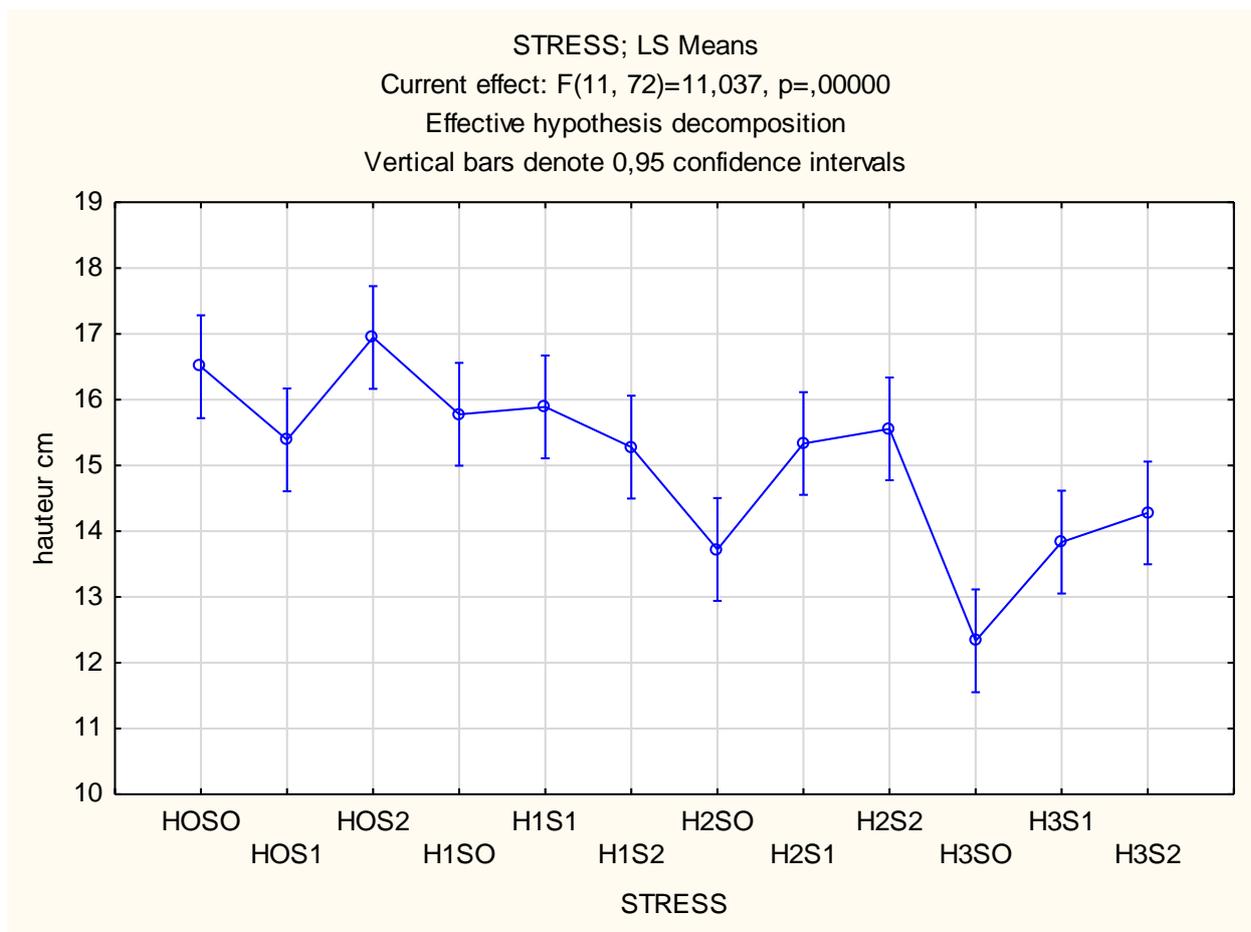


Figure 23 : Effet du stress sur la hauteur des plantes

Il apparait clairement que l'effet conjoint du stress salin et hydrique a limité le développement de la hauteur (Tableau 24 ; Annexe). En effet, la plus faible hauteur moyenne 12.33 cm est obtenue avec le niveau de stress H3S2 (Fig.24).

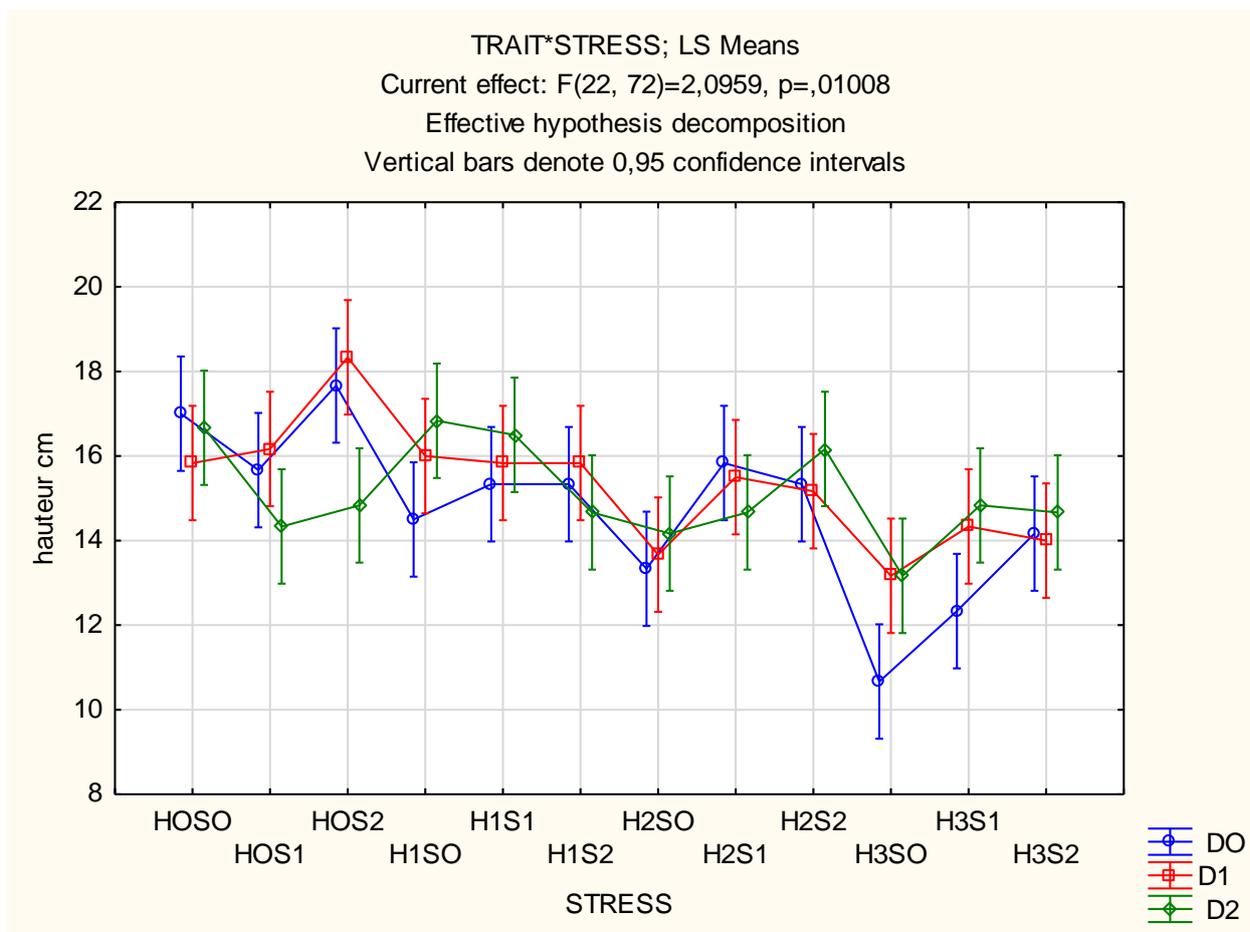


Figure 24 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la hauteur des plantes

4.2.2 La surface des feuilles

La surface foliaire ne laisse aucune différence significative soit pour l'effet traitement ($F=0.95 ; P=0.38$) ou l'effet stress ($F=0.98 ; P=0.46$) ou encore l'effet interaction stress *traitement ($F=0.98 ; P=0.49$).

Le test de comparaison Tukey HSD pour l'effet traitement classe tous les traitements pour cette variable en un seul groupe (Tableau 26 ; Annexe) La surface des feuilles varie entre 12.88cm^2 pour le niveau DO à 15.23cm^2 pour D2 (Fig. .25).

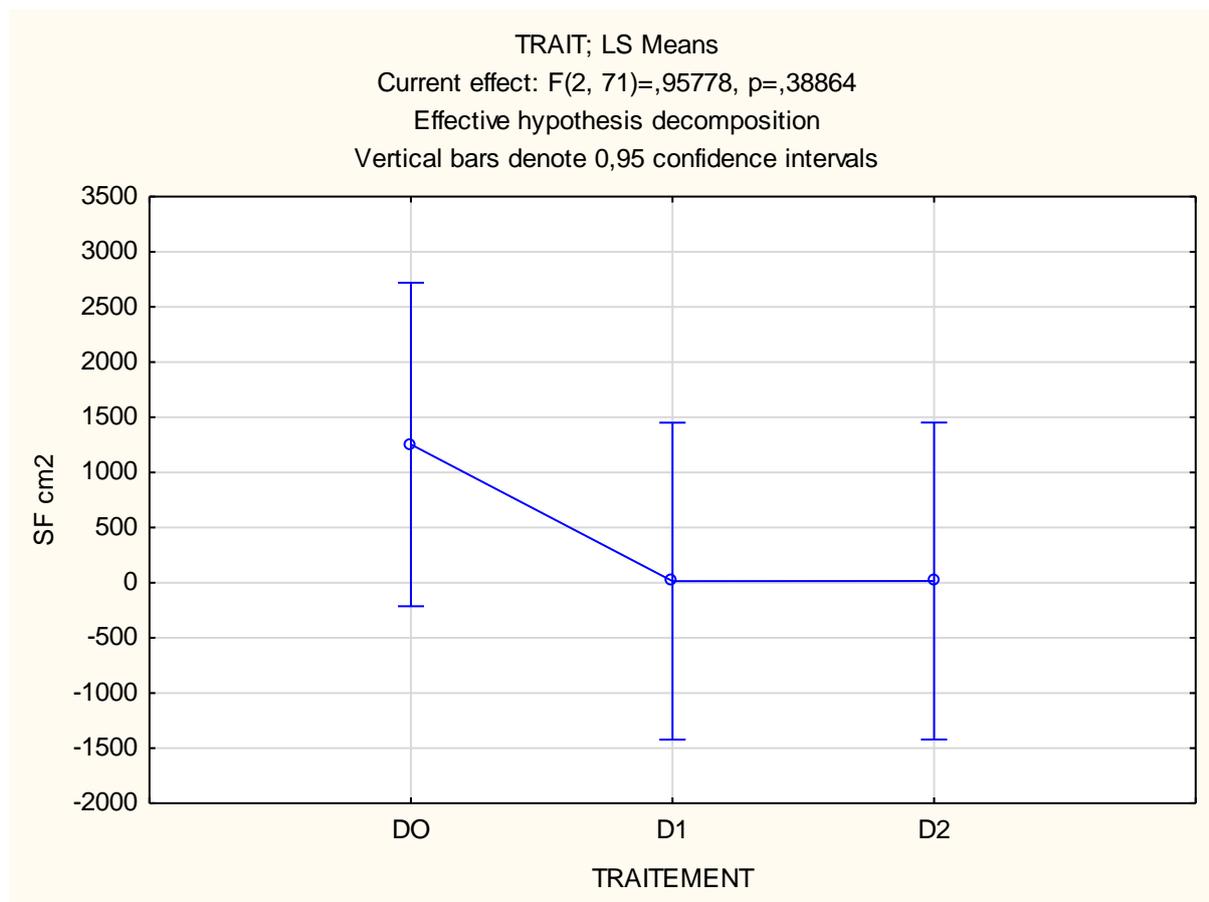


Figure 25 : Effet du traitement biochar sur la surface des feuilles des plantes

Pour les stress appliqués les résultats montrent aussi qu'il n'existe aucune différence entre les moyennes (Fig .26), par conséquent le teste de comparaison des moyennes Tukey HSD montre un seul groupe (Tableau 27 ; Annexe)

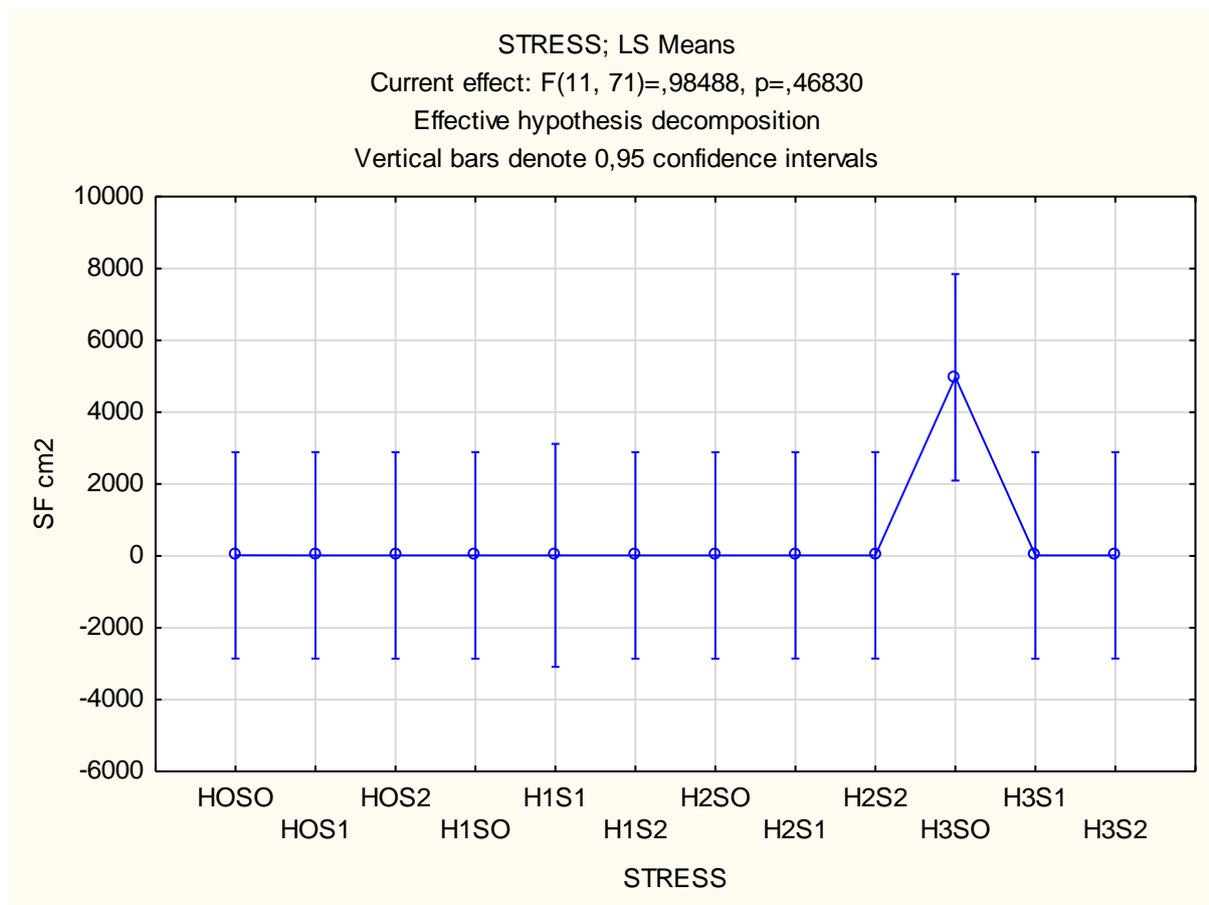


Figure 26 : Effet du stress sur la surface des feuilles des plantes

Concernant l'effet interaction on remarque la même observation, aucune différence entre les différents niveaux (Fig.27)

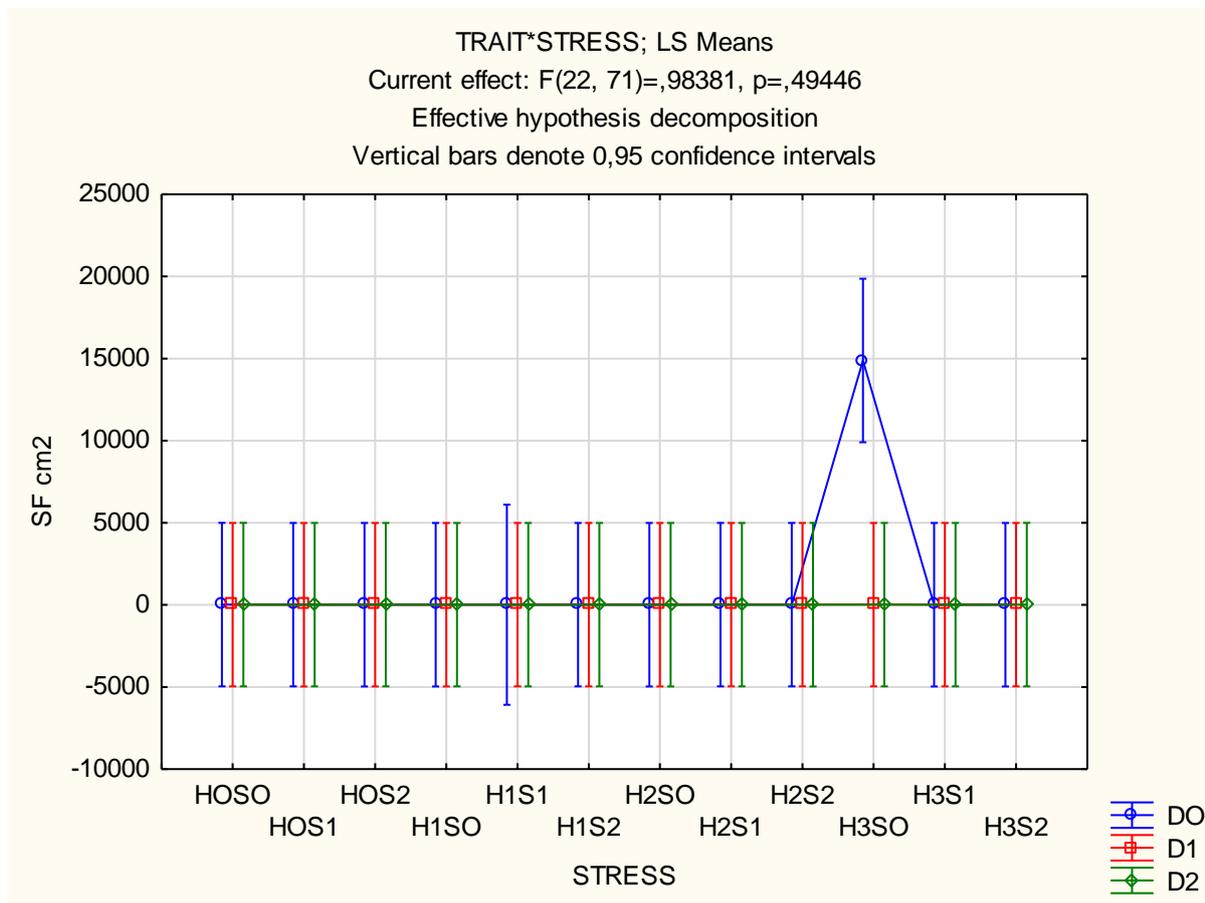


Figure 27 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la surface des feuilles des plantes

4.2.3. La biomasse aérienne au stade maturité

L'analyse de la variance révèle une amélioration significative ($F=4.57$; $P=0.013$ de la biomasse sous l'effet des biochars. Le test de Tukey HSD montre à cet effet, les deux groupes $D2;DO > D1$ (Tableau 28 ; Annexe).

Les moyennes obtenues sont 2.60 et 2.59, 2.47g/plant respectivement pour les mêmes doses (Fig.28).

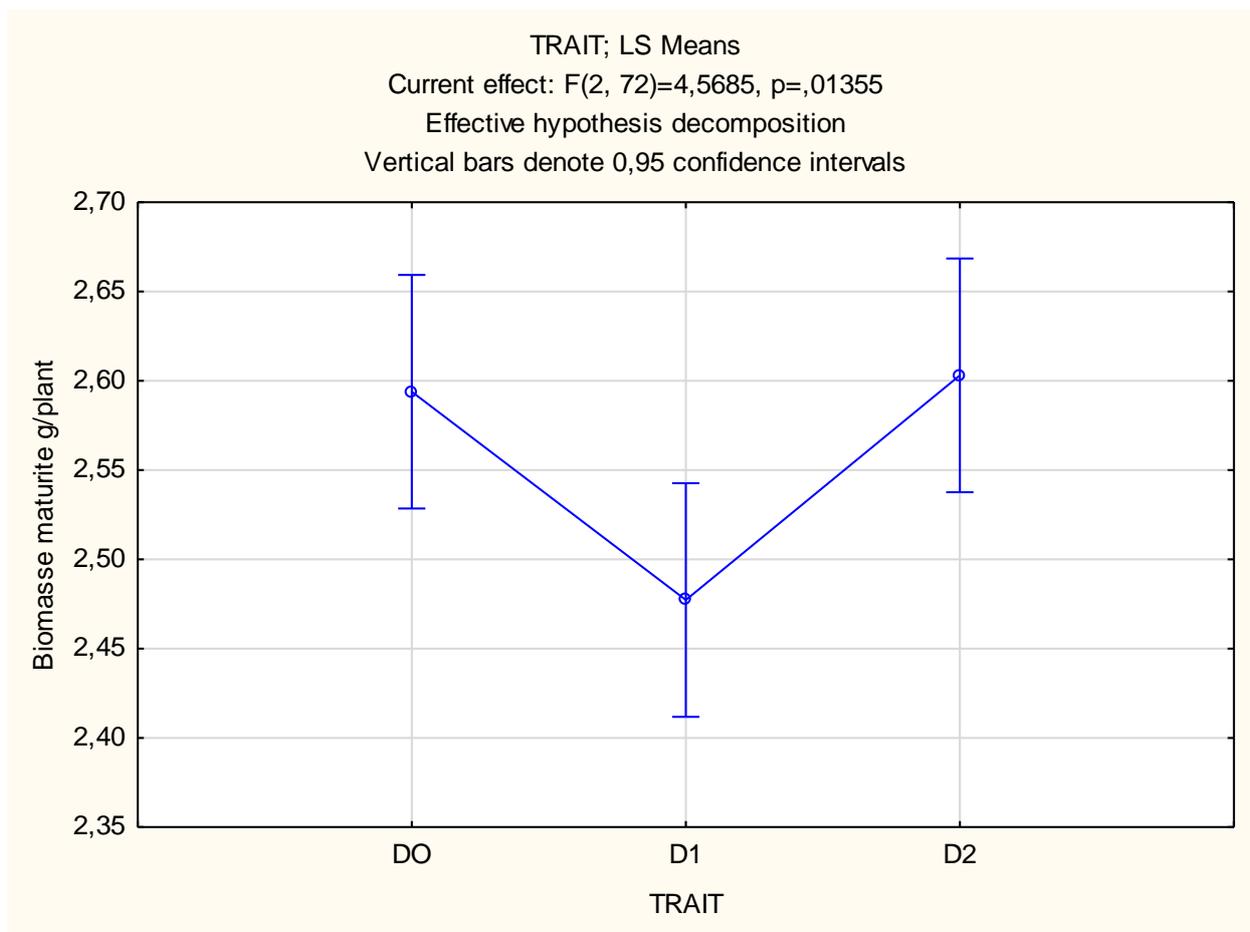


Figure 28 : Effet du traitement biochar sur le développement de la biomasse

Concernant l'application du stress il est clair que le stress affecte significativement ($F=176.37 ; P<0.000001$) négativement le développement de la biomasse. En effet, on remarque que la plus forte biomasse est obtenue avec les niveaux de traitement de stress les plus faibles à ce sujet le test de comparaison des moyennes Tukey HSD indique que la biomasse la plus élevée est allouée à HOSO 4.17g/plant alors que, la plus faible est retenue avec le niveau de stress les plus fort H3S2 (Fig.29)

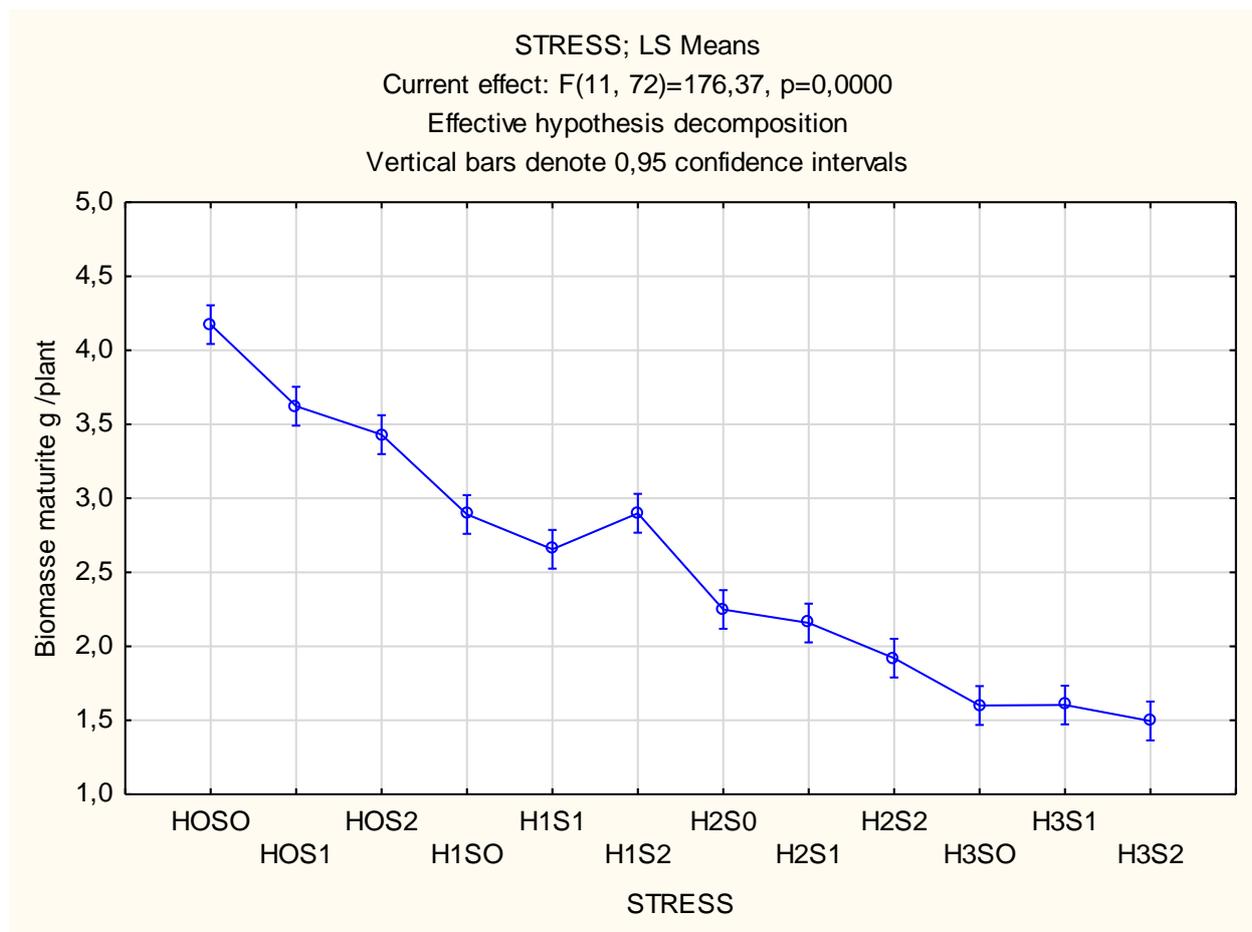


Figure 29 : Effet du stress sur la biomasse

Il apparait toujours que dans le cas de l'interaction pour tous les niveaux de stress la biomasse la plus faible est obtenue avec le traitement D1, aussi pour le traitement DO les pots ayant reçu la dose S2 de sels (H1S2 et HOS2) ont montré une augmentation dans leurs biomasse (Fig.30).

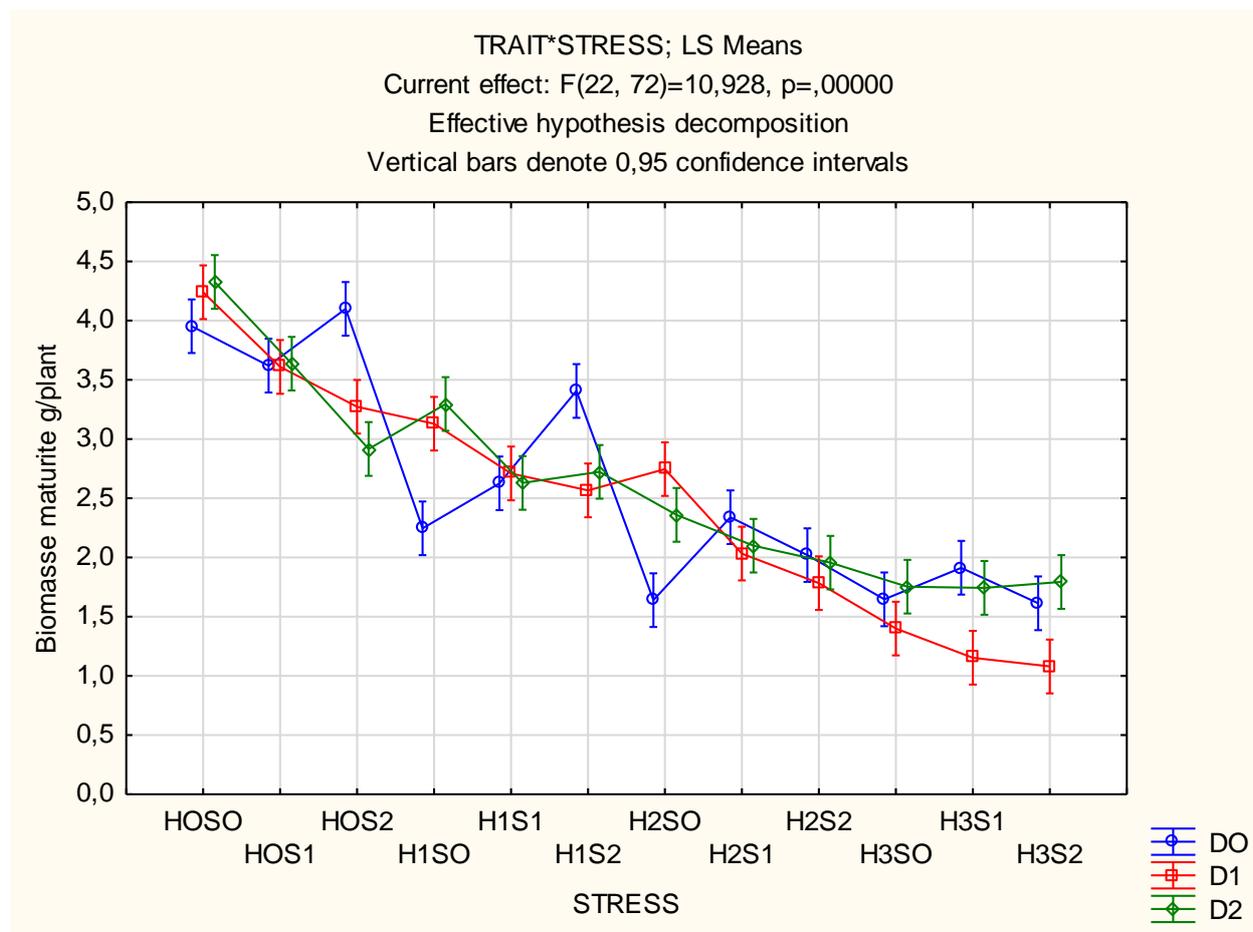


Figure 30 : Effet de l'interaction stress * traitement sur le développement de la biomasse

4.2.4 La chlorophylle A

L'étude de l'évolution du pigment chlorophylliens a note un effet traitement hautement significatif ($F= 42.30 ; P < 0.000001$) ; cependant l'effet stress est non significatif ($F=1.06 ; P=0.39$). L'interaction stress*Traitement est significatif ($F= 1.97 ; P= 0.016$).L'étude des moyennes montre que le traitement de biochars a engendré une augmentation dans la teneur de la chlorophylle a avec les deux doses D1 ($1.54 \mu\text{g/g MF}$) et D2 ($1.71\mu\text{g/gMF}$) ces deux traitements forment un groupe supérieur à DO ($0.618\mu\text{g/gMF}$) (Fig.31).

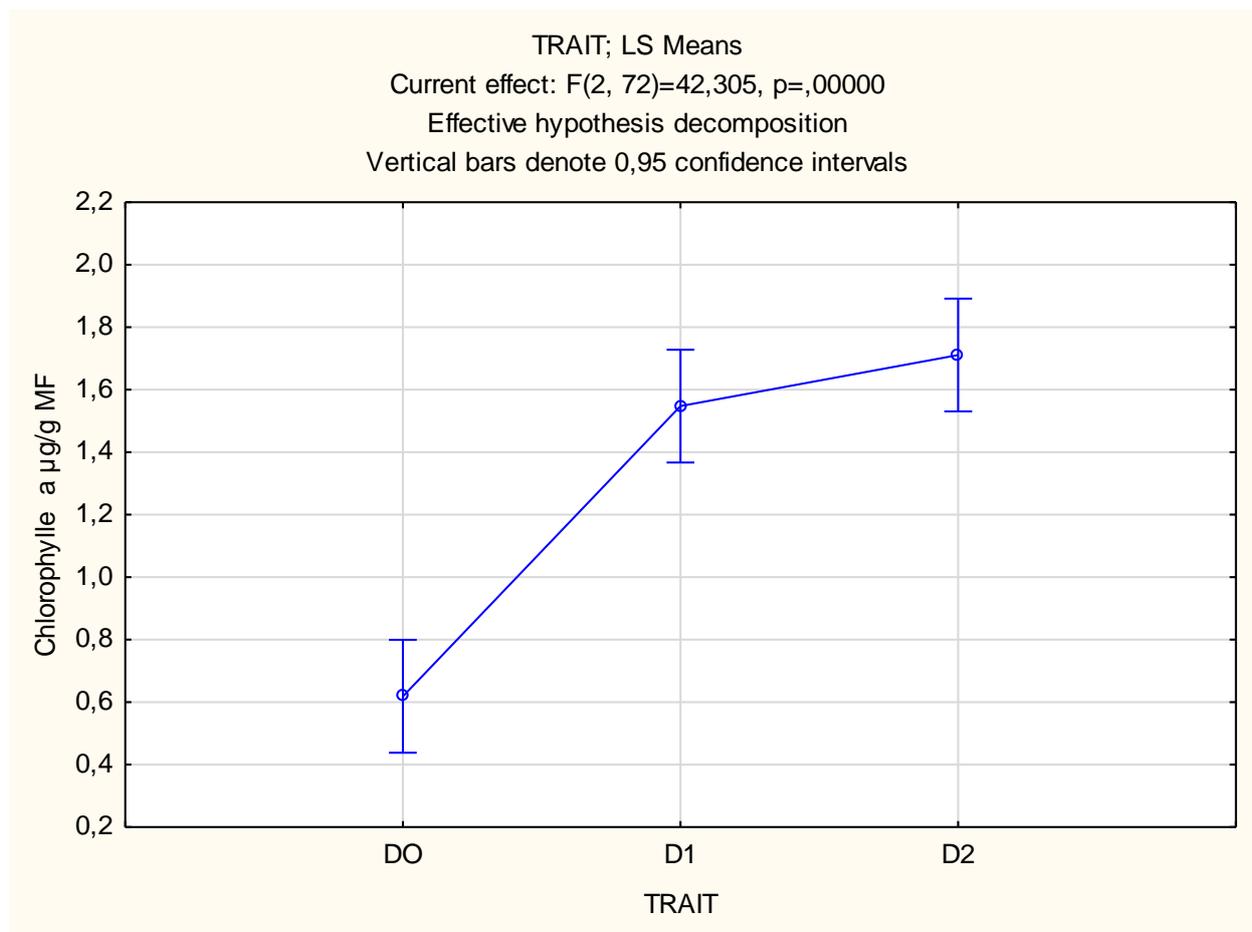


Figure 31 : Effet du traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle A

L'application du stress n'a montré aucune variation dans la teneur de la chlorophylle a (Fig.32). Tous les niveaux appartiennent au même groupe (Tableau 33 ; Annexe)

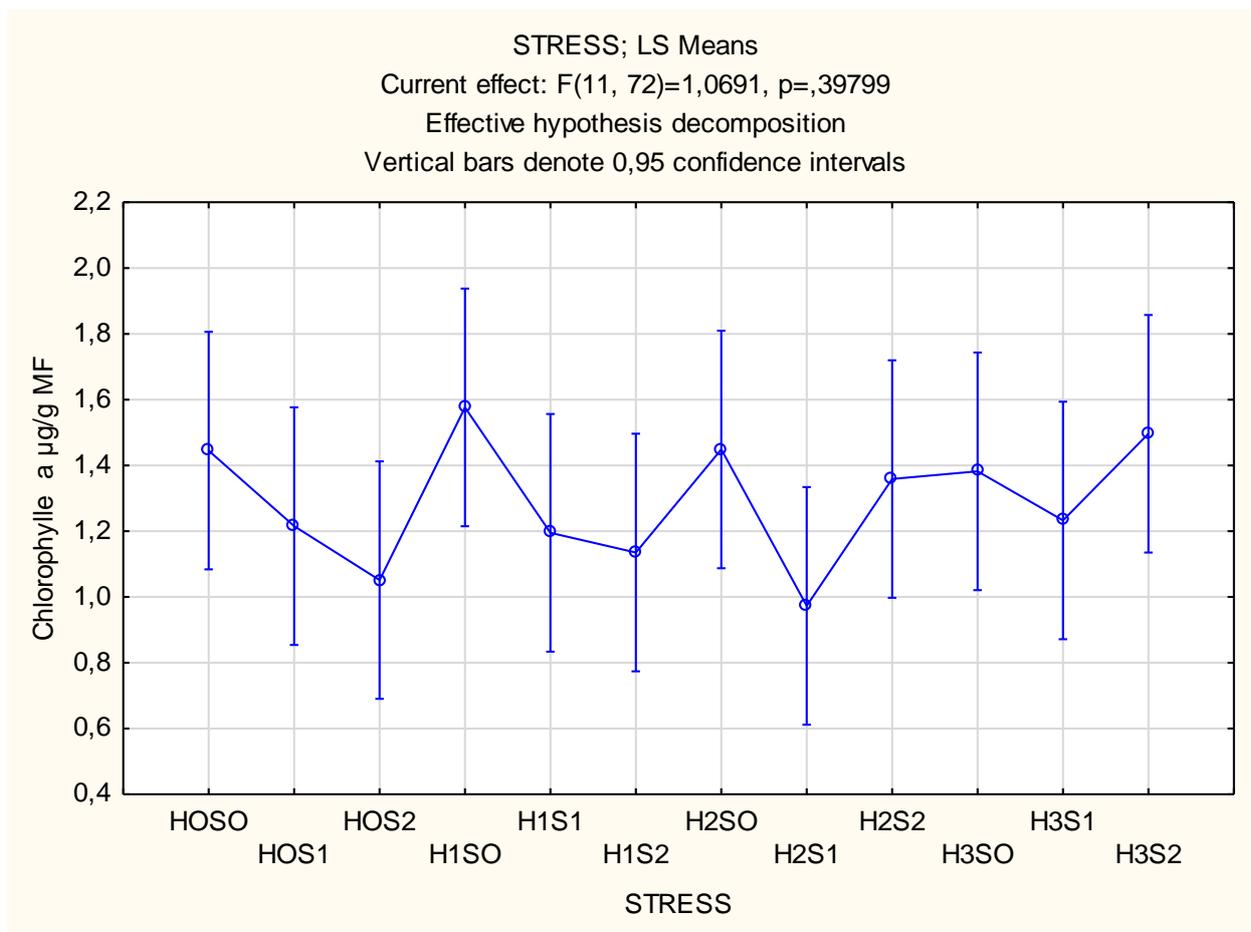


Figure 32 : Effet du stress sur la teneur de la chlorophylle A

Avec l'effet interaction, l'application du biochar a permis de maintenir la teneur de la chlorophylle stable même avec les niveaux de stress les plus forts contrairement à la dose témoin DO (Fig.33).

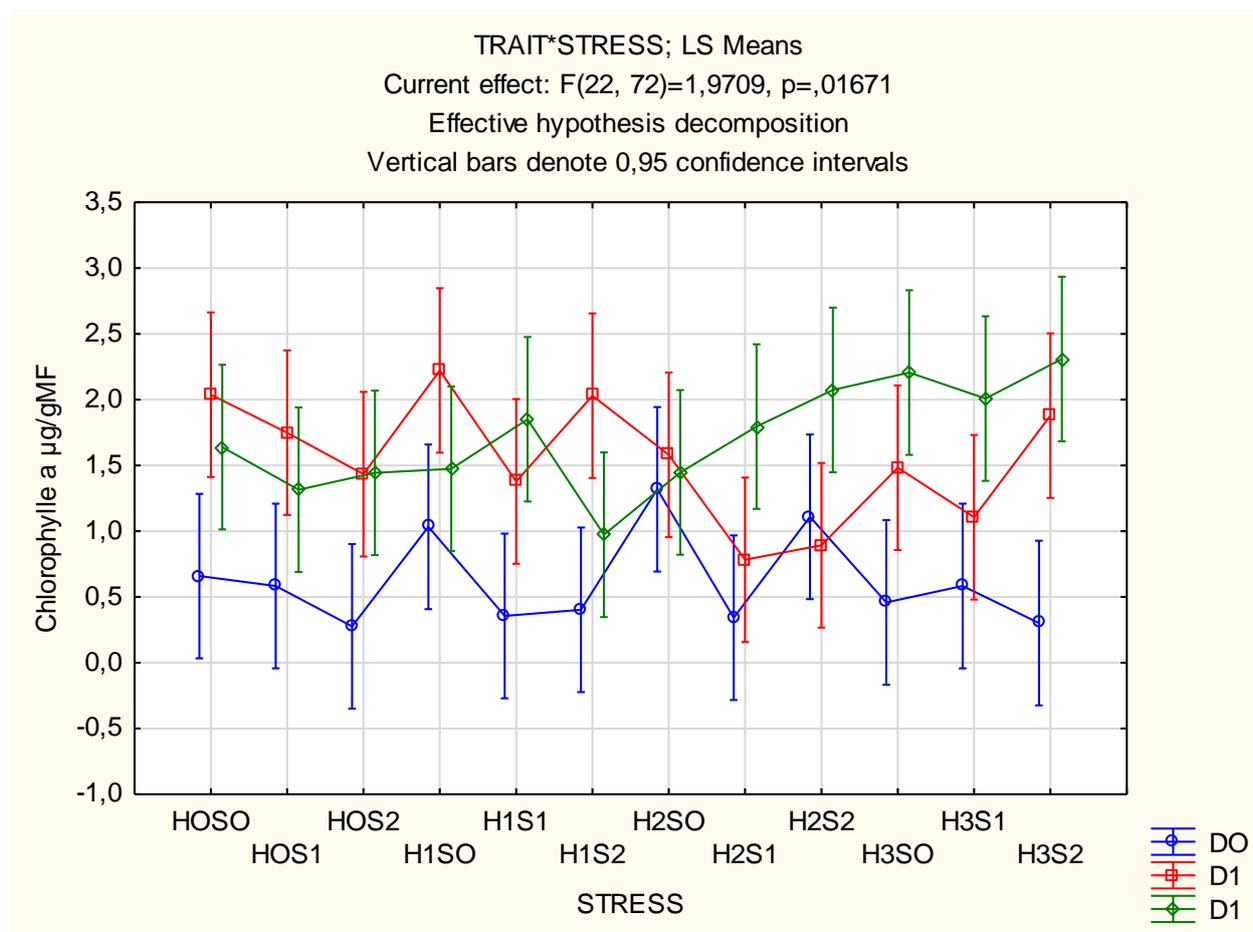


Figure 33 : Effet de l'interaction stress * traitement sur la teneur de la chlorophylle A

4.2.5. La chlorophylle B

La teneur de la chlorophylle b a montré la même tendance que celle de la chlorophylle a. L'effet stresses non significatif ($F=1.15 ; P=0.33$), le traitement biochar est significatif ($F=9.45 ; P< 0.0002$), l'effet interaction stress*traitement ($F= 1.54 ; P=0.085$) est non significatif.

Les teneurs de chlorophylles les plus élevées sont notées avec la dose D2, D1. Alors que la plus faible teneur est celle de DO (Fig.34)

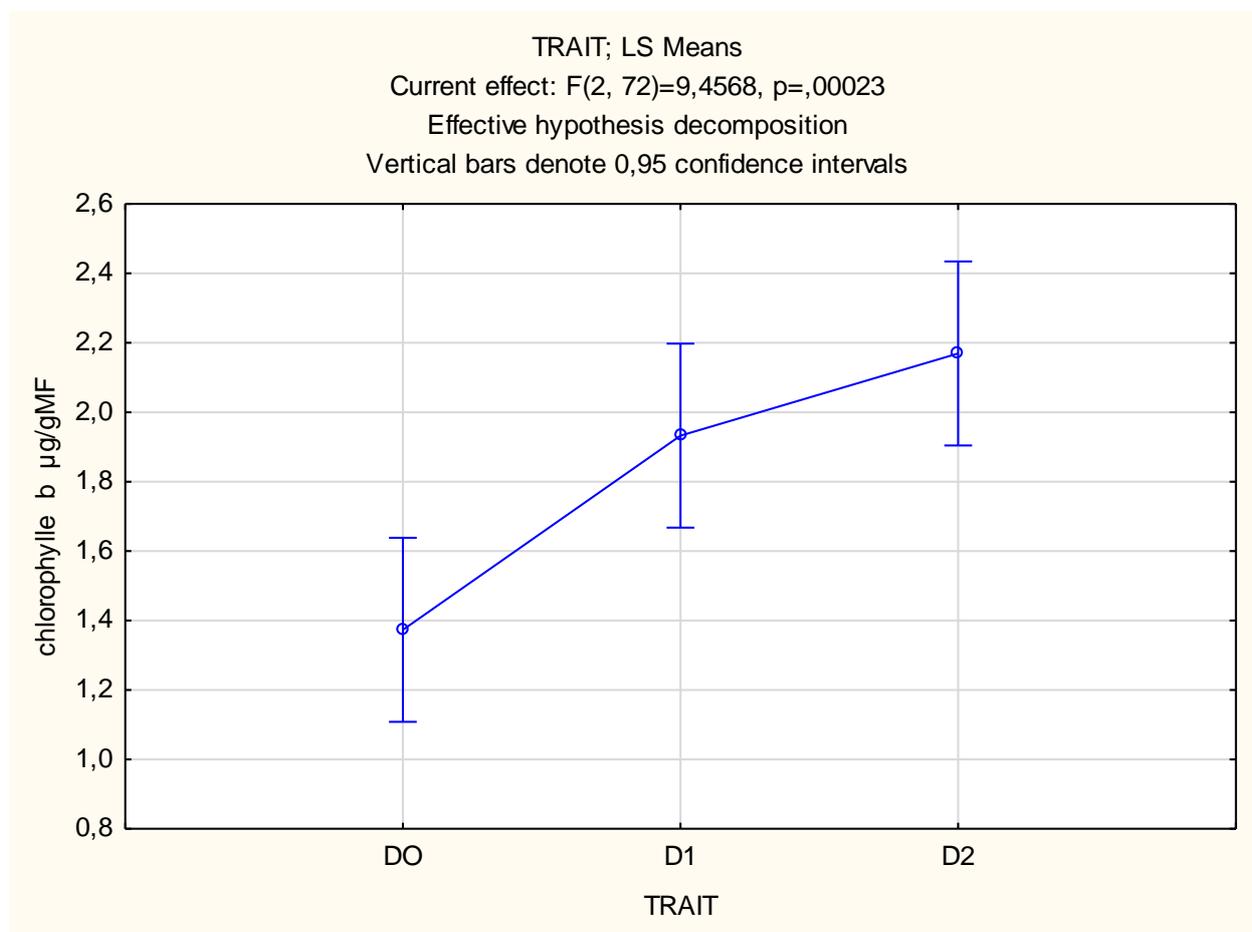


Figure 34 : Effet du traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle B

Le test de Tukey HSD montre ces deux groupes $D2, D1 > DO$ 5 (Tableau 34 ; Annexe). Il est clair que le stress appliqué n'a pas affecté ce pigment d'où tous les traitements sont classés dans le même groupe (Tableau 36 ; Annexe). Les teneurs varient entre 2.519 µg/g MF pour le niveau H1S0 et 1.45 µg/g MF pour HOSO (Fig.35).

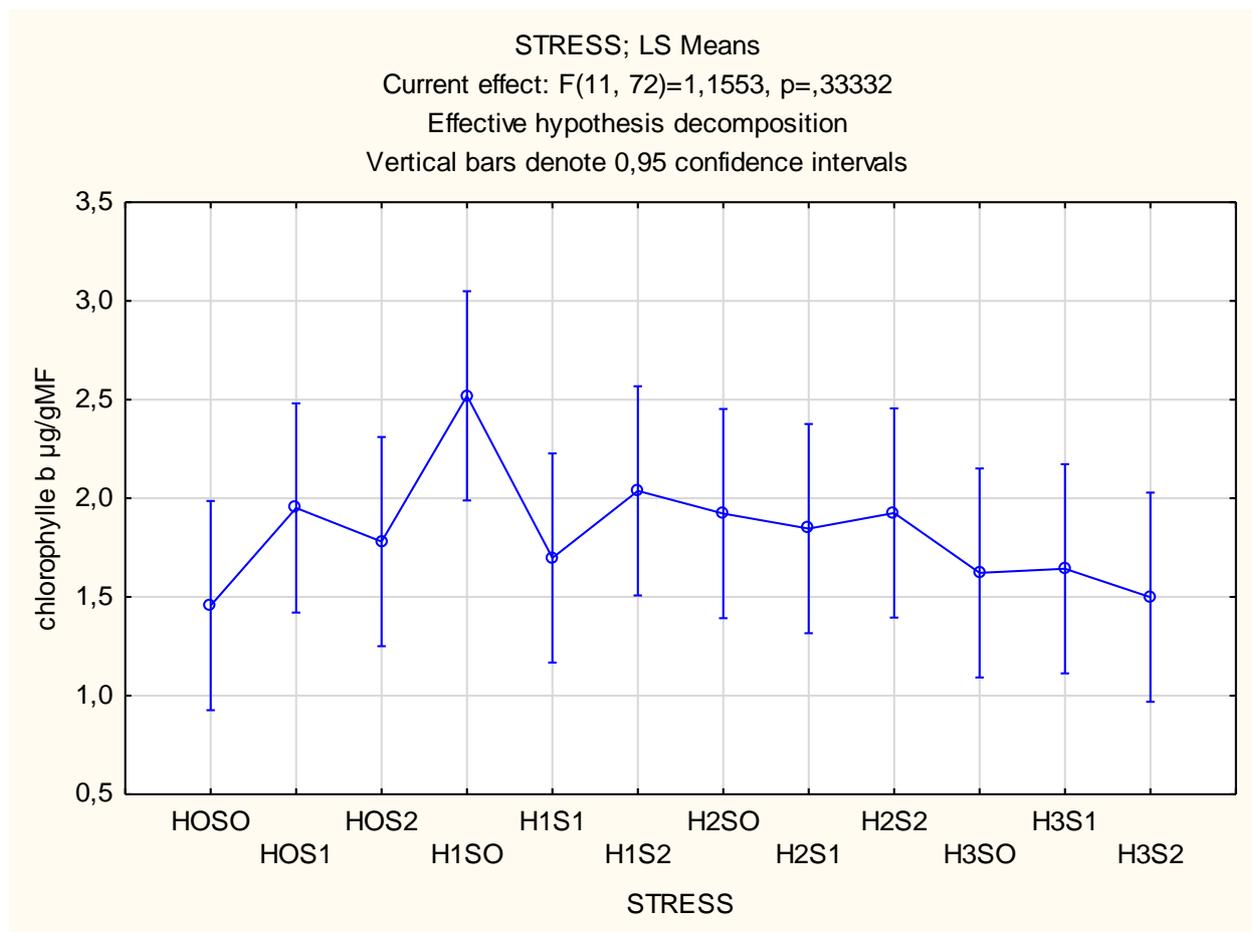


Figure 35 : Effet du stress sur la teneur de la chlorophylle B

L'interaction stress traitement indique que les deux doses de biochars ont montré les teneurs les plus élevées et ceci à travers tous les niveaux de stress appliquées (Fig.36).

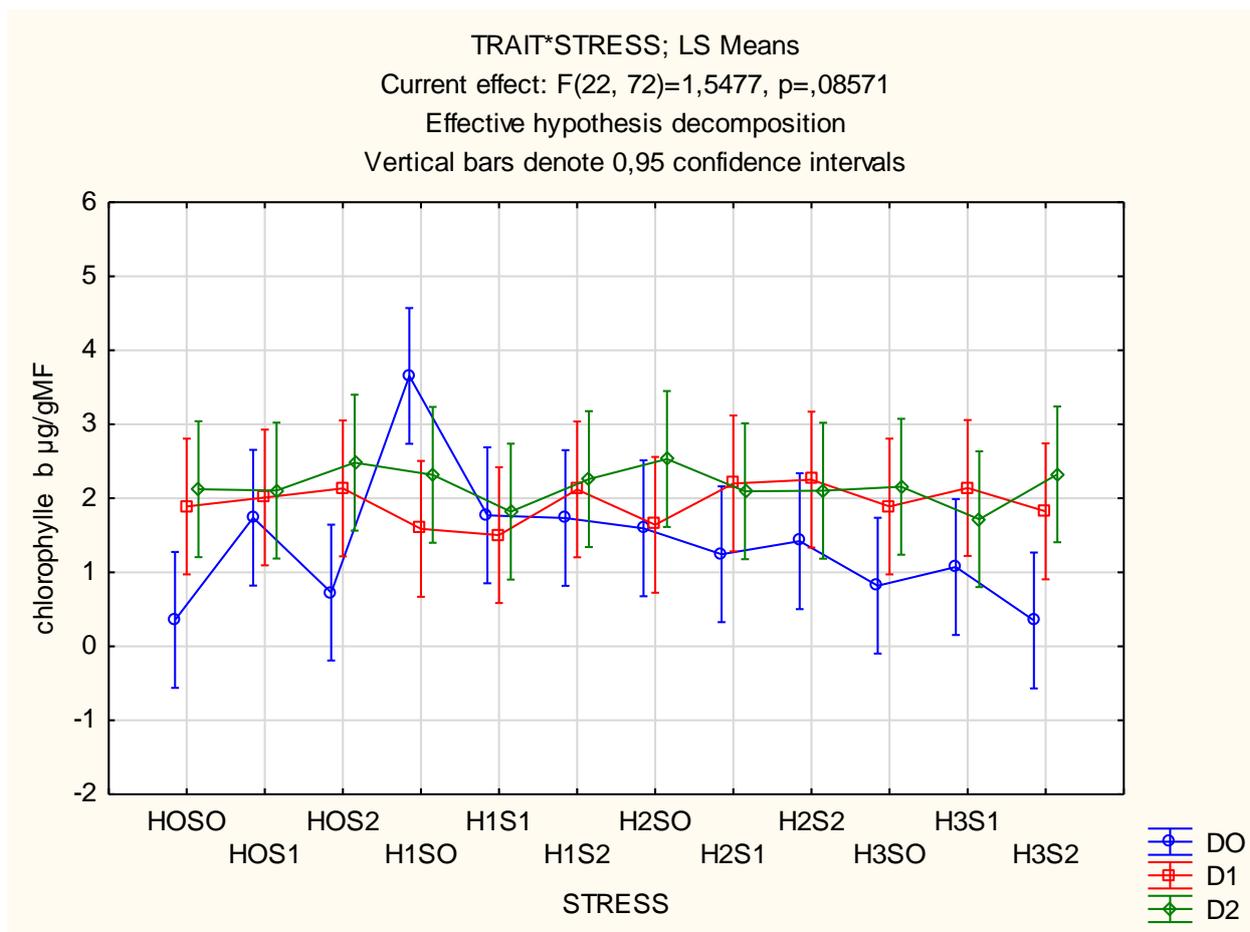


Figure 36 : Effet de l'interaction stress*traitement sur la teneur de la chlorophylle B

4.2.6. La chlorophylle A et B

L'Anova indique un effet traitement significatif ($F= 45.19 ; P< 0.00001$), l'effet stress est non significatif ($F=1.46 ; P= 0.165$), l'interaction stress * traitement est significatif ($F= 2.11 ; P=0.009$). Les valeurs les plus élevées sont obtenues avec la dose D2 ($3.88\mu\text{g/g MF}$), et D1 ($3.48\mu\text{g/gMF}$). La plus faible valeur est notée avec la dose DO $1.99 \mu\text{g/gMF}$ (Fig.37).

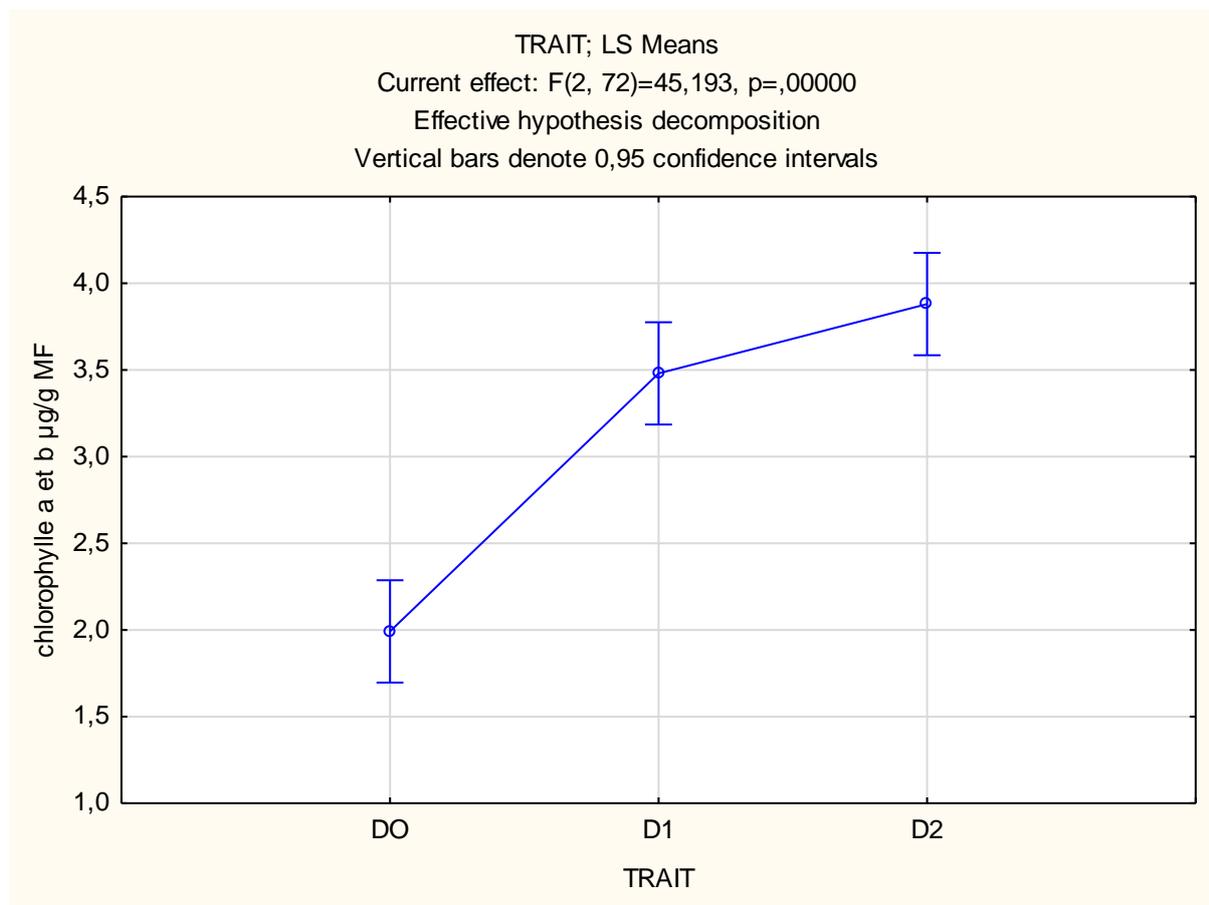


Figure 37 : Effet du traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle A et B

La variation de la teneur de la chlorophylle a et b est proche pour tous les niveaux de stress (Fig38).

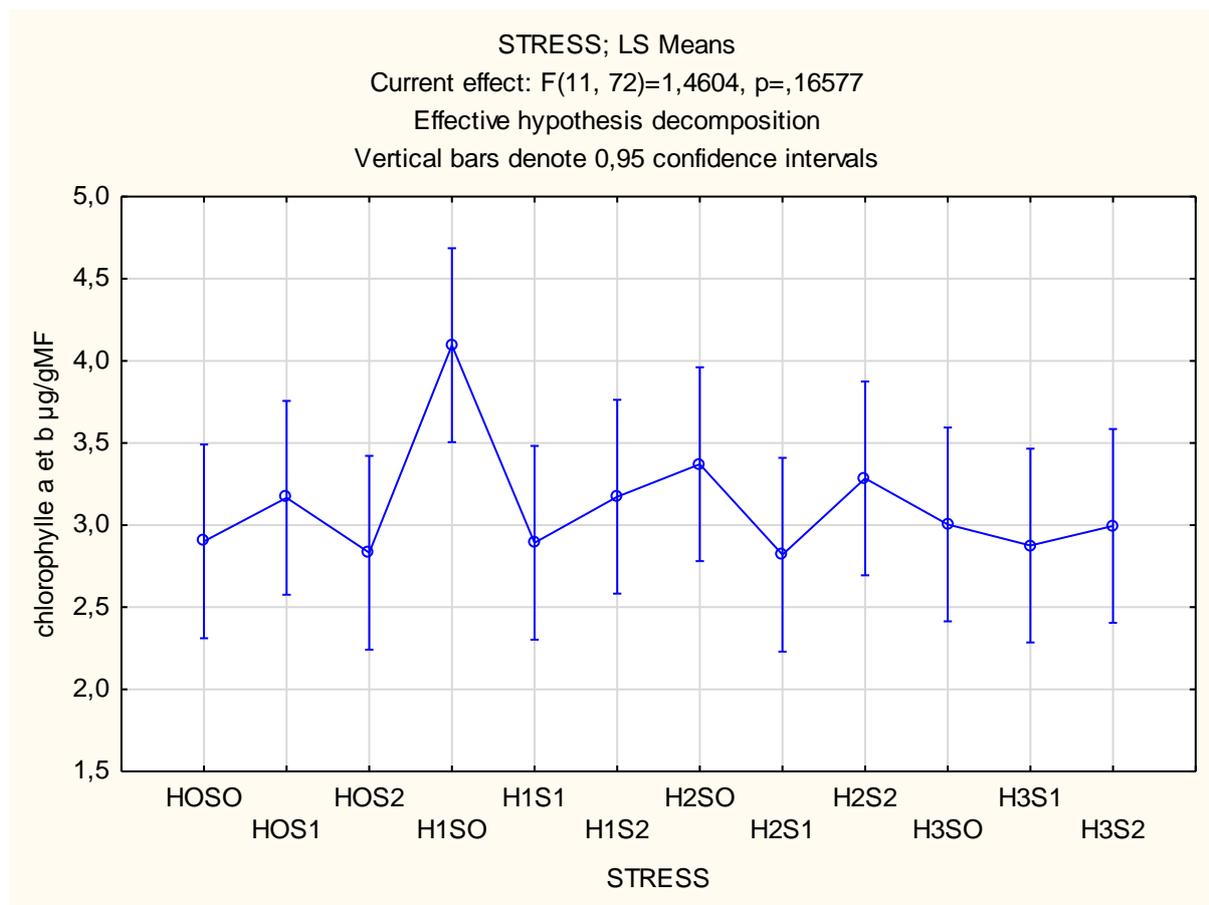


Figure 38 : Effet du stress sur la teneur de la chlorophylle A et B

Il apparait aussi, que l'interaction stress* traitement les teneurs sont aussi proches(Fig.39).

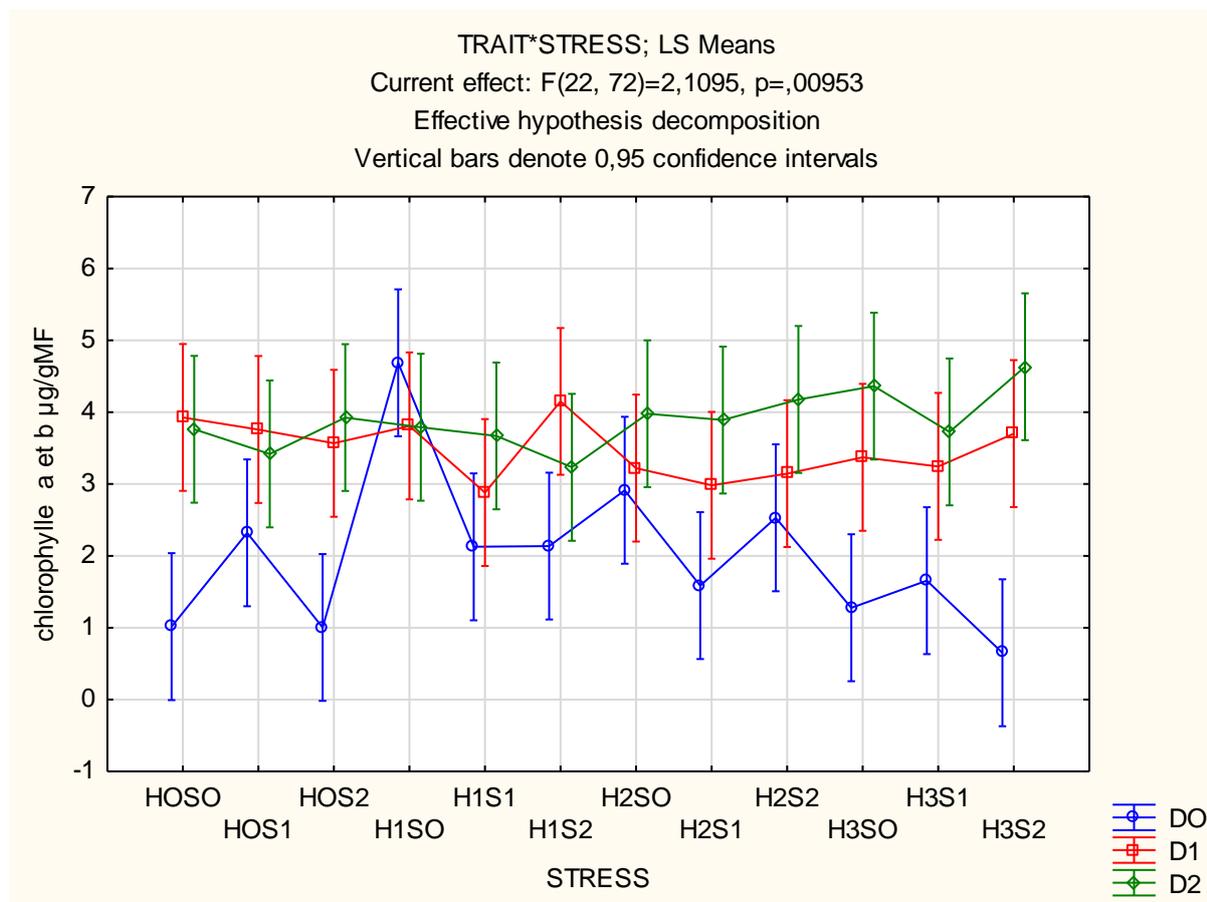


Figure 39 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la teneur de la chlorophylle A, B

4.2.7. La teneur relative en eau

L'analyse statistique de la teneur relative en eau laisse voir un effet traitement hautement significatif ($F=31.57 ; P<0.00001$) ; concernant le stress appliqué sur les plantes, on remarque aussi que ce dernier accuse un effet hautement significatif ($F= 19.22 ; P<0.00001$). L'interaction stress* traitement est aussi très significatif ($F= 4.34 ; P< 0.00001$).

L'application du biochar a induit une amélioration dans la teneur relative en eau des feuilles, la comparaison des moyennes laisse voir trois groupes. On obtient le premier groupe avec D2 (45.54%) > D1 (44.00%) >DO (42.75%) (Fig.40).

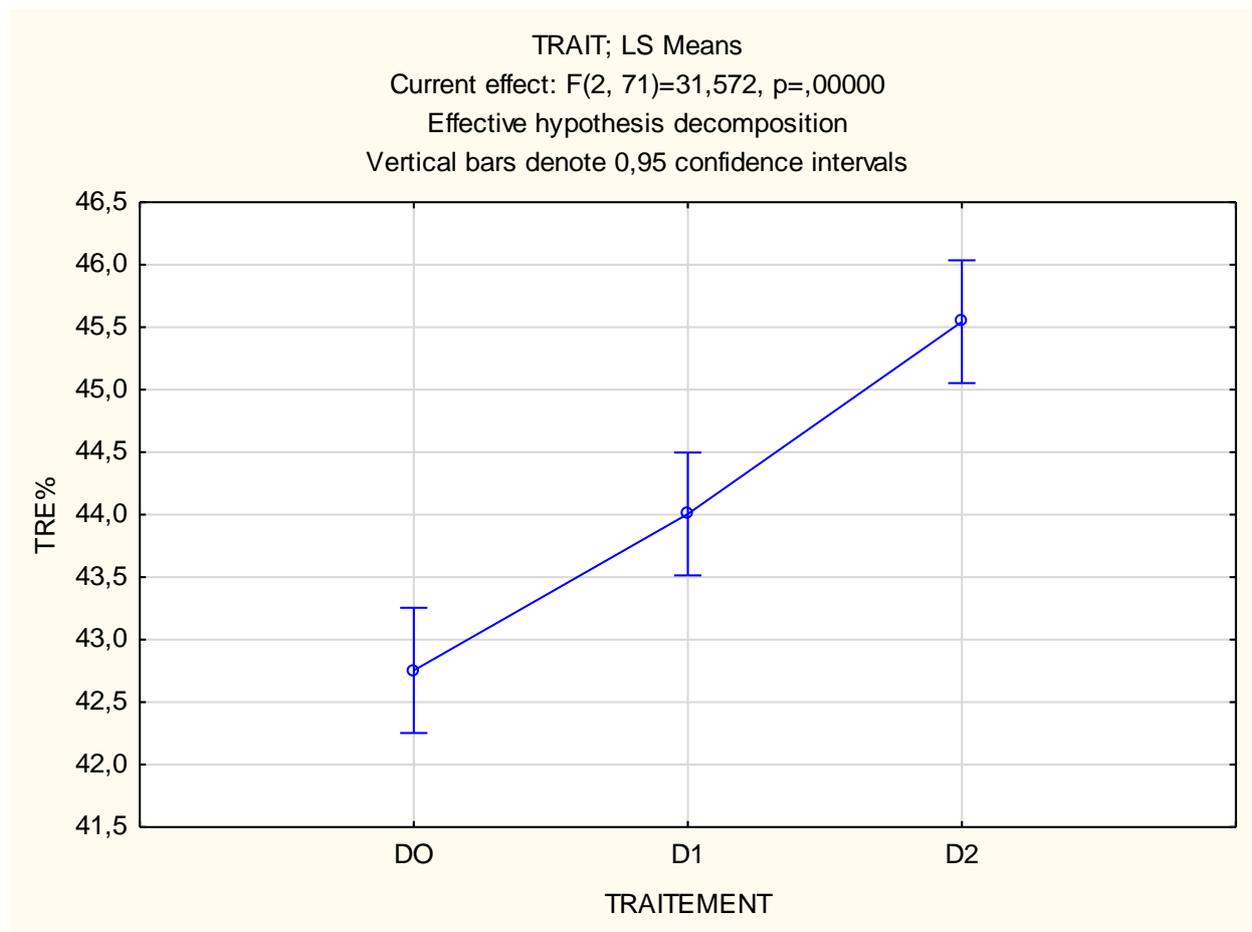


Figure 40 : Effet du biochar sur la teneur relative en eau des feuilles

Le stress repartie les valeurs en cinq groupes (Tableau 42 ; Annexe) dont la plus haute valeur 47.93% avec le niveau HOSO, la plus faible teneur est allouée au niveau H3S2 (40.75%) (Fig.41).

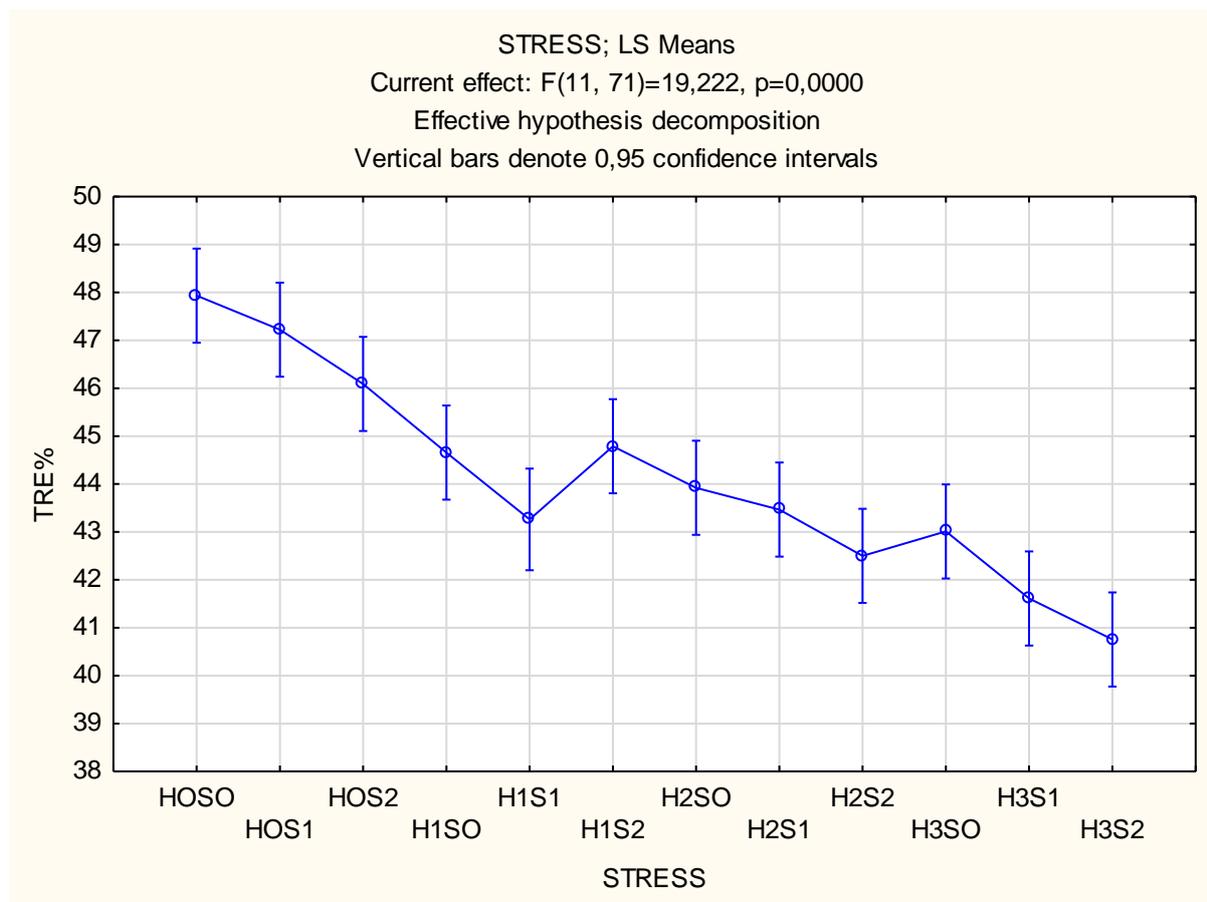


Figure 41 : Effet du stress sur la teneur relative en eau des feuilles

Il apparaît aussi que pour la teneur relative en eau que le traitement D2 apporte une bonne amélioration en eau des feuilles pour tous les niveaux de stress en comparaison avec le traitement D1 et DO (Fig.42).

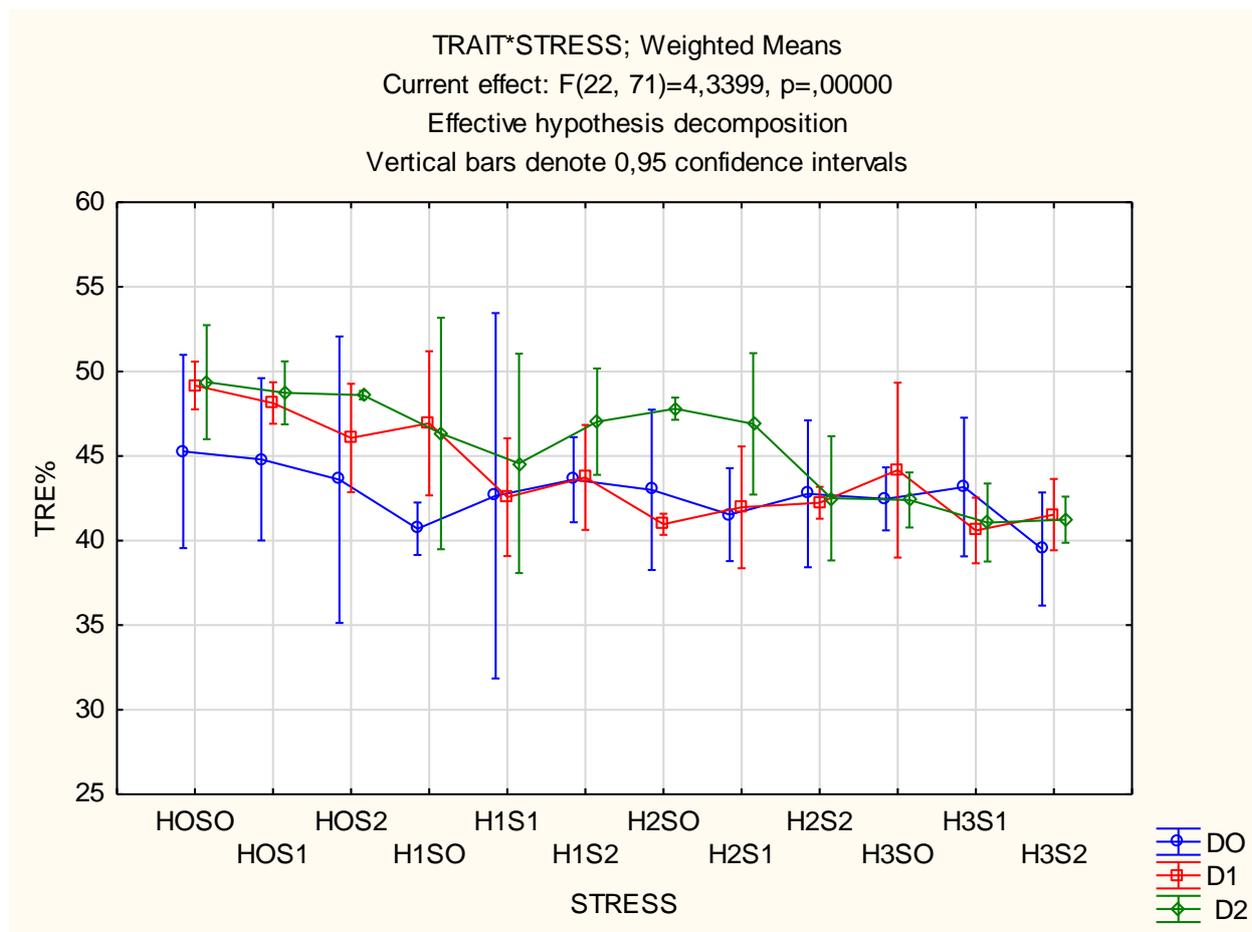


Figure 42 : Effet de l'interaction stress* traitement sur la teneur relative en eau des feuilles

DISCUSSION

5. Discussion

5.1 Les paramètre du sol

Sous l'effet du biochar le pH devient dans cette étude plus alcaline par rapport à son état initial, cet effet revient à la composition de ce bio-solide. Les analyses de caractérisation effectuées sur ce fertilisant montrent qu'il est riche en calcaire actif et total. Ainsi l'épandage permet un ajout de ces deux composantes dans le sol entraînant une élévation du pH (**Glaser et al., 1998**). Il est aussi clair qu'en présence des stress appliqués le pH augmente. Cette observation peut s'expliquer par le fait que, le stress hydrique associé au stress salin permet une forte accumulation de sels dans le sol qui devient basique. Il est rapporté aussi, que le biochar contient des cendres alcalines de concentrations variables qui rendent son pH basique (**El-Naggar et al., 2019**).

En général, les biochars produits par pyrolyse sont alcalins, et le pH augmente avec la température de production. L'ajout des biochars augmente le pH des sols mais de gros ajouts peuvent légèrement diminuer l'alcalinité (**Uzoma et al., 2011**).

Son incorporation au sol entraîne une élévation du pH du sol et permet ainsi de lutter contre le phénomène d'acidification des sols (**Lélé, 2016**).

Il ressort aussi que, la dose D1 permet une bonne dilution de calcaire à partir du biochar dans le sol entraînant une augmentation plus importante de pH dans ce niveau de traitement en comparaison avec la dose D2. Ce phénomène s'explique par l'humidité. En effet on remarque que les teneurs de l'humidité dans les pots D1 est supérieur à celle de D2, ainsi l'excès d'humidité a favorisé plus de dissolution dans le calcaire dans ces pots par rapport aux pots D2.

Les teneurs du calcaire actif et total augmentent dans le sol sous l'effet de l'amendement biochar et stress appliqués, ceci confirme le rôle de ce fertilisant (biochar) à améliorer le stock du sol en ces éléments, cependant l'application du stress conjugué avec le traitement biochar induit une diminution dans la teneur du calcaire total qui visiblement inférieure au sol témoin. Ceci montre que, le calcaire total se transforme en calcaire actif d'où l'amélioration dans cette étude de la teneur en ce dernier composant sous l'effet des différents traitements stress et

Discussion

biochars. En réalité plusieurs auteurs ont rapporté l'effet positif du biochar à limiter le stress et à activer le métabolisme enzymatique qui permet la transformation du calcaire total en calcaire actif. Dans notre étude il s'est établi une bonne transformation de calcaire total en actif dans les différents traitements conjugués (stress et biochar) contrairement au sol témoin, entraînant ainsi une élévation du calcaire actif pour les traitements (stress et biochars) et inversement une diminution en calcaire total en comparaison avec le sol témoin. Dans le sol témoin l'activité enzymatique est affecté négativement par le stress entraînant une faiblesse dans la minéralisation du calcaire total en actif contrairement pour les sols qui ont reçu le biochar ou l'activité enzymatique est renforcé par la matière organique de ce bio solide (**Du et al., 2019 ; Sadoun,2021**). Il est connu que les sels de sodium agissent sur les propriétés physiques et chimiques du sol, entraînant un gonflement et une dispersion des éléments dans l'argile, le sodium réduit la perméabilité des grandes porosités induisant une inhibition de certains oligo-éléments nécessaire pour les plantes ou la mobilisation des ions (**David 99 Suarez 200 Shaggs et al., 200**).

Il apparaît d'une façon générale que dans tous les pots ayant reçu le biochar que le sol devient salé (Diarra et al., 2019). Cette élévation de la CE s'explique par la présence de divers minéraux organiques et non organiques existant dans ce fertilisant (**Sadounet Messioughi, 2021**). La composition du biochar est riche en différents éléments (hydroxydes et oxydes de Ca^{2+} , Mg, K et Na peut, après ajout aux sols augmenter la conductivité électrique (**Chemsa,2019**).

Il apparaît aussi que l'application du stress salin et hydrique entraîne une augmentation dans la CE, qui est très visible avec les niveaux de stress les plus accentués, cette observation ne contredit pas la bibliographie qui rapporte une augmentation de la CE sous l'effet du stress hydrique, salin ou sous l'effet d'un stress conjugué entre les **deux (Saidi et al., 2004)**

Dans les situations de stress, le sol joue un rôle de matrice de rétention pour les différents types de sels, soit anions ou cations ; pour augmenter son potentiel osmotique permettant ainsi de limiter l'effet de l'évaporation, entraînant en conséquence une élévation de la CE (**ElOumri et Vieillefon , 1983**).

L'apport du biochar (conjugué au stress hydrique et salin) favorise plus l'augmentation de la CE en comparaison avec le sol témoin, cet effet s'explique par le fait que ce fertilisants est lui-même une source de différents sels minéraux, ainsi une fois ajouté dans le sol le biochar augmente le stock de sels engendrant ainsi une augmentation dans la CE (**Chemsa, 2019**).

Discussion

Concernant l'humidité, les résultats confirment le rôle positif de ce bio solide dans l'amélioration de la teneur en eau dans le sol. En effet plusieurs auteurs (**Boudjabi et al., 2016**) rapportent que les fertilisants organiques jouent le rôle d'une éponge qui maintiens l'eau en favorisant l'amélioration de l'humidité du sol. Aussi, il apparait plus les niveaux de stress augmentent plus la teneur en eau dans le sol est faible cependant cette diminution est moins accentuée avec l'application du biochar conjugué au stress, cette observation confirme l'effet interaction observé pour la CE qui conclut à une accumulation de sels à partir du biochar entraînant une plus de rétention dans l'eau dans le sol (**Brodowski et al., 2006**).

Le biochar agi sur plusieurs propriétés du sol dont la porosité, la densité apparente, la capacité de rétention en eau du sol. En effet, ce bio solide par sa structure stable et extrêmement poreuse (**Blanco-canqui, 2017**) ; il favorise aussi l'augmentation de la porosité du sol, facilitant ainsi son approvisionnement en oxygène (**Yanai et al., 2007**) et permettant l'augmentation de sa capacité de rétention en eau (**Blanco-Canqui, 2017**).

A rajouter aussi que, L'interaction entre le biochar avec la matière organique améliore la structure du sol par la formation de micro agrégats stables au cours du temps (**Brodowski et al., 2006**) ce qui favorise au mieux la rétention de l'eau

La teneur du carbone s'améliore par l'ajout du biochar ceci reviens à la composition du biochar qui est très riche en carbone obtenu par pyrolyse de déchets agricoles et animaux sous apport limité d'oxygène (**Cornelissen et al., 2016**).

Selon les résultats obtenus, on remarque une augmentation du pourcentage de carbone à mesure que la quantité de charbon augmente, et la différence est nette entre le groupe D0 et D1, ainsi qu'entre D1 et D2.

En effet, la présence des biochars augmente la capacité des sols d'adsorber des nutriments, de retenir de l'eau et de stocker du carbone. La capacité des biochars à améliorer la qualité des sols dépend de nombreux facteurs (matière première et processus de pyrolyse utilisés, climat, types et pH des sols, profondeurs d'enfouissement, variétés cultivées, etc.), dont les rôles respectifs et les interactions sont encore très mal connus. Toutefois, dans des sols tropicaux pauvres, l'utilisation des biochars pour améliorer leur fertilité en utilisant la technique de brûlis sous butte de terre (slash and char) ou combinés avec des engrais minéraux et d'autres substrats organiques (composts) semble une technique économiquement viable, qui mérite des

études plus détaillées. (Ascough P. L., Bird M. I., Wormald P., Snape C. E., Apperley D., 2008).

Il se révèle aussi que le stress est diminué par le biochar, à ce terme plusieurs chercheurs rapportent l'effet positif de la matière organique dans l'amélioration de l'humidité du sol. L'interaction indique que, plus on augmente la dose de biochar plus l'effet du stress est toléré dans le sol. La structure poreuse du biochar favorise aussi l'augmentation de la porosité du sol, facilitant ainsi son approvisionnement en oxygène (Yanaïet *al.*, 2007) et permettant l'augmentation de sa capacité de rétention en eau (Blanco-Canqui, 2017).

L'évolution des nitrates montre que les nitrates s'accumulent surtout dans le niveau de traitement D1, ceci s'explique par le fait que cette dose pourrait être favorable pour l'activité des bactéries. Cependant, avec la plus forte dose D2 de biochar les nitrates diminuent, on peut avancer qu'il s'est établi avec cette dose un « choc d'azote » relié à une forte adsorption de cet élément azoté par le biochar limitant ainsi sa disponibilité pour dans le sol (Hugill, 2013).

Il est connu que, le biochar riche en carbone a une capacité d'adsorption active de nutriments et plus particulièrement l'ammonium (NH_4^+) et les nitrates (NO_3^-) par immobilisation de l'azote dans ces porosités (Guo, 2020).

On pense que dans notre étude avec la plus forte dose D2 de biochar, il s'est établi une immobilisation et une diminution dans la transformation des matières azotées en nitrates dans le sol (Hugill, 2013).

D'une façon générale l'augmentation conjuguée du stress hydrique et salin diminue la minéralisation des matières organiques à base d'azote, limitant ainsi la possibilité d'enrichir le sol en nitrates, plusieurs auteurs rapportent que l'activité des nitrogénases diminuent sous l'effet des stress soit hydrique ou aussi salin (Boudjabi, 2016).

5.2. Les paramètres de la plante

L'évolution de la biomasse et la hauteur montre que ces dernières diminuent sous l'effet du stress hydrique et salin pour tous les niveaux. Cette diminution est un trait majeur visé par les plantes pour limiter et réduire les besoins en eau lorsque celle-ci est très limitée dans le milieu environnant de la plante (Bonneau, 1998). L'augmentation de la pression du sol rend difficile

Discussion

l'approvisionnement en eau des plantes (**Halitim 9 Chama ou et legros 99 Saidi et al., 200**) Ainsi, pour obtenir de l'eau, les plantes sont obligées d'ajuster leur pression osmotique par rapport au sol.

Il apparait aussi que, l'amendement de biochar a été valorisé uniquement en termes de biomasse mais pas en hauteur des plantes et en surfaces des feuilles. Toutefois, les hauteurs enregistrées dans les traitements DO (témoin) sont légèrement inférieures aux traitements Biochar. Malgré la forte teneur des nitrates observés dans le sol pour la dose D1 montre que ce minéral n'a pas été utilisé et valorisé par la plante dans la production de sa biomasse. D'une façon générale la production de la plante soit en surface des feuilles ou hauteur n'a pas été obtenue dans cette étude, on pense que ces observations sont reliées à la dose appliquée, en effet selon Prapagdee et Tawinteung (2017) une dose de biochar supérieur à 10t/ha réduit la croissance des plantes en raison de la forte alcalinité de ce bio solide.

Corroborant à nos retrouvailles (**Hagemann et al., 2017**) ont rapporté que l'amendement du sol par les biochars améliore la production des plantes par un gain supplémentaire de rendement faible qui ne dépasse guère 20%. Aussi de son côté **Alotaibi (2021)** a trouvé que le biochar a eu peu d'incidence sur la taille des plantes de maïs et aussi sur la longueur des racines.

Les teneurs obtenues pour la chlorophylle a et b appartiennent à la gamme de concentration rencontrées dans les plantes. En effet, selon **Heller et al. (1998)** la teneur de la chlorophylle a dans la plante est de 2mg/ Kg MF cependant, nos résultats pour le pigment chlorophyllien b est supérieur à la teneur fixée par ces auteurs (0.75mg/kg MF). L'effet conjugué du traitement biochar avec le stress affecte négativement la chlorophylle a et la chlorophylle totale (a+b). Ce phénomène, serait certainement dû à la réduction de l'ouverture des stomates des feuilles, qui visent à limiter l'effet de la transpiration dans les cas des stress ce qui conduit à une dilution de la chlorophylle (**Dugo, 2002**).

Concernant l'effet traitement, on observe une bonne amélioration dans la teneur des deux pigments a et b qui est relative à la dose de biochar. Il est visible qu'une bonne nutrition induit une bonne activité photosynthétique (**Conzalez et al., 2002**). D'autres part le biochar est une source importante de plusieurs éléments essentielles dans la composition de la chlorophylle dont l'azote, le zinc, le fer et le magnésium (**Ouzounidou et al., 1992 ; Nandillon,2019**).

Discussion

Dans ces recherches **Alotaibi (2021)** trouve que le biochar atténue dans une large mesure l'impact de la salinité sur la chlorophylle et sur le facteur de fluorescence.

La teneur relative en eau s'améliore avec l'augmentation des traitements biochar. Nous pensons que l'amélioration de l'humidité du sol sous l'effet des traitements a engendré une préservation de l'eau dans les feuilles des plantes. Nos résultats corroborent avec (**Boudjabi et al., 2016**) qui obtiennent une amélioration significative en la teneur hydrique des feuilles sous l'effet d'un amendement de boue résiduaire conjugué avec un stress hydrique, cet auteur obtient la valeur de 61.42 ± 18.69 % avec la plus forte dose de boue résiduaire. Dans cette étude, la teneur en eau des feuilles diminue sous l'effet des stress. Cet effet est dû à un phénomène de déshydratation qui touche les cellules végétales (**Dugo, 2006**). Nos résultats joignent ceux d'**Alotaibi (2021)** qui mentionne une perte dans la teneur en eau des feuilles qui ont subis un stress salin.

CONCLUSION

Conclusion et perspective

- **Les résultats concluent à :**
 - L'incorporation de bio-charbon avait une incidence favorable sur les propriétés du sol et sur quelques propriétés de la plante de blé dur,
 - L'application du biochar a permis d'amortir l'effet du stress sur la plante et sur quelques paramètres du sol, notamment l'humidité, cependant à une forte dose de 60g/pot il s'est établie un choc en élément azote,
 - Il serait très intéressant d'entreprendre cette recherche de mettre en évidence l'accumulation des métaux lourds dans le sol et dans la plante,
 - Aussi mettre en relief les concentrations des minéraux associés au stress (sodium et potassium) dans la matière végétale.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Alotaibi, K. D. (2021). Use of biochar for alleviating negative impact of salinity stress in corn grown in arid soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1-10.
- Antal, M.J., Grønli, M., 2003. The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial Engineering and Chemical Research* 42, 1619–1640.
- Baize D (2000) Guide des analyses en pédologie : 2e édition, revue et augmentée. Editions Quae.
- Baize, D., Jabiol, B., 1995. Guide pour la description des sols. Techniques et pratiques. Ed INRA.375p.
- Barrs, H., 1968. Determination of water deficit in plant tissues in 'Water deficit and plant growth' Koslowski, T., Ed Acadey Press, New york. 235- 238.
- Blanco-Canqui, H., 2017. Biochar and Soil Physical Properties. *SoilSci. Soc. Am. J.* 81:687–711
- Bonneau, X. (1998). Recherches sur les facteurs limitant la production végétale en conditions de stress hydrique. Cas du cocotier à Gunung Batin (Indonésie): Rôles du chlore dans l'économie de l'eau (Doctoral dissertation, INA-PG).
- Boudjabi, S. 2016. Réponses physiologiques et biochimiques de quelques variétés de blé dur sous contraintes hydriques à l'apport de boues résiduaires. Thèse de Doctorat Université de Batna 224p.
- Bréda N (1999) L'Indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue forestière française*. Edition. AgroParisTech, Nancy, France. <https://doi.org/10.4267/2042/5426>
- Brodowski, S., John, B., Flessa, H. et Amelung, W. 2006. Aggregate-occluded black carbon in soil. *European journal of soil science*, 57: 539-546.
- Burnison, B. K. (1980). Modified dimethylsulfoxide (DMSO) extraction for chlorophyll analysis of phytoplankton. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37(4), 729-733.
- Castaing, C., Bila, M., Milési, J. P., Thiéblemont, D., Le Metour, J., Egal, E., Donzeau, M., Guerrot, C., Cocherie, A., Chevremont, P., Teygey, I., Itard, Y., Zida, B., Ouédraogo, I., Koté, S., Kabore, B. E., Ouédraogo, C., Ki, J. C., Zunino, C., 2003. Notice Explicative de la carte géologique et minière du Burkina Faso à 1/1000 000, 3ème Edition, 148 p.
- Chemsal, Y., 2019. Contribution à l'étude de l'évolution d'un sol sableux amélioré avec bio-charbon d'origine végétal dans la région d'El-oued. El -Oued, Algérie :

Références bibliographiques

UniversiteEchahid Hamma Lakhdar -El OUED, 70 p.Mém Master Académique en sciences biologique.

- Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B. H., Sparrevik, M. et Schmidt, H.
- Diarra, B., Gian, N. et Konaté, O.F., 2019 Analyse de la gestion de la fertilité organo-minérale des sols dans les cercles de Koulikoro et de Sikasso (Mali). *Géo.Tropic. Environ.*, 1: 35-44-
- Ding, Ying, Liu, Y.-X., Wu, W.-X., Shi, D.-Z., Yang, M., Zhong, Z.-K., 2010. Evaluation of Biochar
- Du, J., Zhang, Y., Qu, M., Yin, Y., Fan, K., Hu, B., Zhang, H., Wei, M., Ma, C., 2019.Effects of biochar on the microbialactivity and community structure duringsewagesludgecomposting. *BioresourceTechnology*, 272:171-179
- Dugo,M.V.G., 2002. Effet du déficit hydrique sur l'état de nutrition azotée chez les graminéesfourragères. Thèse Université de Poitiers.France. 189 p.
- Effects on NitrogenRetention and Leaching in Multi-LayeredSoilColumns. *Water, Air, &Soil Pollution* 213, 47–55. doi:10.1007/s11270-010-0366-4
- El Oumri, M., &Vieillefon, J. (1983). Étude expérimentale de la conductivité électrique globale des sols. Application à l'Estimation de Leur Salinité. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol*, 10(2), 91-108.
- El-Naggar, A., Lee, S.S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A.K.,Zimmerman, A.R., Ahmad, M., Shaheen, S.M. et Ok, Y.S., 2019. Biochar application to lowfertilitysoils: A review of currentstatus, and future prospects. *Geoderma*337: 536-554. farmer-scalecharcoal/biochar production. *PLoS ONE*, 11(5), 1-16.
- Glaser B., Haumaier L., Guggenberger G., Zech W. 1998. Black Carbon in Soil: theuse of benzenecarboxylicacids as specific markers. *OrganicGeochemistry*,29: 811-819.
- Gonzalez, D.M.V ., 2006 Effet du déficit hydrique sur l'état de la nutrition azotée chez les graminées fourragères . Thèse de doctorat. Université de Poitiers 189p.
- Graber, E.R., Harel, Y.M., Kolton, M., Cytryn, E., Silber, A., David, D.R., Tsechansky, L.,Borenshtein, M., Elad, Y., 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper andtomatogrown in fertigatedsoilless media. *Plant and Soil* 337, 481–496.

Références bibliographiques

- Guo, M., 2020. The 3R Principles for Applying Biochar to Improve Soil Health. *Soil Syst.*, 4(1), 9.
- Hagemann, N., Kammann, C. I., Schmidt, H. P., Kappler, A. et Behrens, S., 2017.
- Heller, R., Esnault, R., Lance, C., 1998. *Physiologie végétale. Tome I. Nutrition.* 6^{ème} Ed Dunod 315 p.
- <https://doi.org/10.3390/soilsystems4010009>.
- Hugill, B. 2013. *Le Biochar - Une maison biologique pour les microbes du sol.* 17391 Durrance Road, North Fort Myers, Florida 33917, USA | 239.543.3246
- Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D (2011). Biochar effects on soil biota – A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1812–1836.
- Lélé, N.B. 2016. Potentiel d'amélioration de la fertilité des sols sableux et acides de Kinshasa (RDC) par l'usage du charbon des bois (biochar), de la biomasse végétale et des engrais minéraux. Thèse de doctorat. Université de Liège, Belgique, 196.
- Liu, S., Zhang, Y., Zong, Y., Hu, Z., Wu, S., Zhou, J., Jin, Y., Zou, J., 2016. Response of soil carbon dioxide fluxes, soil organic carbon and microbial biomass carbon to biochar amendment: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* 8, 392–406.
- Manyá, J.J., 2012. Pyrolysis for biochar purposes: A review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental Science and Technology* 46, 7939–7954.
- Nandillon, R. (2019). *Phytostabilisation des éléments métalliques d'un technosol minier végétalisé par le genre Salix assistée par du Biochar* (Doctoral dissertation, Université d'Orléans).
- Nitrate capture and slow release in biochar amended compost and soil. *PloS one*, 12(2), e0171214. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171214>
- Prapagdee, S et Tawinteung, N., 2017. Effects of biochar on enhanced nutrient use efficiency of green bean, *Vigna radiata* L. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*;24(10):9460-9467. doi: 10.1007/s11356-017-8633-1
- P., 2016. Emissions and char quality of flame-curtain “Kon Tiki” kilns for
- Piletain, F., Mathieu C., 2003. *Analyse chimique des sols. Méthodes choisies.* Lavoisier édition TEC et DOC. 376p.
- Revell, K.T., Maguire, R.O., Agblevor, F.A., 2012. Influence of poultry litter biochar on soil properties and plant growth. *Soil Science* 177, 402–408.

Références bibliographiques

- Rodier, J., Bazin C., Broutin J. C., Chambon P., Champsaur H., Rodi L., 1996. L'analyse de l'eau. 8ème Ed, Dunod, Paris, 1383 pp.
- Sadoun, A., &Messioughi, M. (2021). Etude du pouvoir tampon (équilibre pH) d'un sol sablonneux traité avec un bio-charbon d'origine végétale dans la région d'El-Oued.
- Saidi, D., Le Bissonnais, Y., Duval, O., Daoud, Y., &Halitim, A. (2004). Effet du sodium échangeable et de la concentration saline sur les propriétés physiques des sols de la plaine du Cheliff (Algérie). *Etude et gestion des sols*, 11(2), 137-148.
- 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.
- Yanai, Y., Toyota, K. et Okazaki, M. 2007. Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments. *Soil Science and Plant Nutrition*, 53, p : 181-188.

ANNEXES

Tableau 1 : Résultats de l'ANOVA pour le p H du sol

Univariate Tests of Significance for PH (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	6300,403	1	6300,403	197924,2	0,000000
TRAIT	3,382	2	1,691	53,1	0,000000
STRESS	0,979	11	0,089	2,8	0,004394
TRAIT*STRESS	3,664	22	0,167	5,2	0,000000
Error	2,292	72	0,032		

Tableau 2 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur le pH du sol

Tukey HSD test; variable PH (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,03183, df = 72,000					
Cell No.	TRAIT	PH Mean	1	2	3
1	DO	7,403056	****		
3	D2	7,680278		****	
2	D1	7,830278			****

Tableau 3 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur le pH du sol

Tukey HSD test; variable PH (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,03183, df = 72,000					
Cell No.	STRESS	PH Mean	1	2	
9	H2S2	7,476667	****		
10	1H3SO	7,512222	****	****	
3	HOS2	7,537778	****	****	
2	HOS1	7,557778	****	****	
5	H1S1	7,607778	****	****	
8	H2S1	7,620000	****	****	
1	HOSO	7,688889	****	****	
12	H3S2	7,704444	****	****	
7	H2SO	7,712222	****	****	
4	H1SO	7,715556	****	****	
6	H1S2	7,743333	****	****	
11	H3S1	7,777778		****	

Tableau 4 : Résultats de l'ANOVA pour la conductivité électrique du sol

Univariate Tests of Significance for CE (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	181746022	1	181746022	21939,58	0,000000
TRAIT	557030	2	278515	33,62	0,000000
STRESS	9684641	11	880422	106,28	0,000000
TRAIT*STRESS	6569078	22	298594	36,05	0,000000
Error	596443	72	8284		

Tableau 5 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la conductivité électrique du sol

Tukey HSD test; variable CE (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 8283,9, df = 72,000				
Cell No.	TRAIT	CE Mean	1	2
1	DO	1199,167		****
2	D1	1323,417	****	
3	D2	1369,139	****	

Tableau 6 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la conductivité électrique du sol

Tukey HSD test; variable CE (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 8283,9, df = 72,000							
Cell No.	STRESS	CE Mean	1	2	3	4	5
10	H3SO	786,111		****			
1	HOSO	869,111		****			
7	H2SO	900,000		****			
4	H1SO	1162,889				****	
11	H3S1	1168,333				****	
12	H3S2	1416,778	****				
5	HIS1	1423,667	****				
2	HOS1	1447,556	****				
3	HOS1	1500,333	****		****		
9	H2S2	1558,889	****		****		
8	H2S1	1624,111			****		****
6	HIS2	1709,111					****

Tableau 7 : Résultats de l'ANOVA pour l'humidité du sol

Univariate Tests of Significance for Hum% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	7529,696	1	7529,696	3881,040	0,000000
TRAIT	23,836	2	11,918	6,143	0,003442
STRESS	72,365	11	6,579	3,391	0,000809
TRAIT*STRESS	166,898	22	7,586	3,910	0,000006
Error	139,689	72	1,940		

Tableau 8 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur l'humidité du sol

Tukey HSD test; variable Hum% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1,9401, df = 72,000				
Cell No.	TRAIT	Hum% Mean	1	2
1	DO	7,705556		****
3	D2	8,531389	****	
2	D1	8,812500	****	

Tableau 9 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur l'humidité du sol

Tukey HSD test; variable Hum% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1,9401, df = 72,000					
Cell No.	STRESS	Hum% Mean	1	2	3
10	10	6,705556		****	
12	12	6,896667		****	****
4	4	7,701111	****	****	****
8	8	8,288889	****	****	****
3	3	8,358889	****	****	****
9	9	8,510000	****	****	****
1	1	8,548889	****	****	****
6	6	8,605556	****	****	****
11	11	8,915556	****	****	****
2	2	9,033333	****		****
7	7	9,235556	****		
5	5	9,397778	****		

Tableau 10 : Résultats de l'ANOVA pour le calcaire actif

Univariate Tests of Significance for calcaire A% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1052,946	1	1052,946	21949,37	0,000000
TRAIT	19,408	2	9,704	202,28	0,000000
STRESS	6,967	11	0,633	13,20	0,000000
TRAIT*STRESS	6,983	22	0,317	6,62	0,000000
Error	3,406	71	0,048		

Tableau 11 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur du calcaire actif

Tukey HSD test; variable calcaire A% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,04797, df = 71,000					
Cell No.	TRAIT	calcaire A% Mean	1	2	3
1	DO	2,630286	****		
2	D1	3,142778		****	
3	D2	3,669167			****

Tableau 12 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur du calcaire actif

Tukey HSD test; variable calcaire A% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,04797, df = 71,000								
Cell No.	STRESS	calcaire A% Mean	1	2	3	4	5	6
2	2 HOS1	2,826667		****				
4	4H1SO	2,845556	****	****				
5	5H1S1	2,882500	****	****				
3	3 HOS2	2,925556	****	****	****			
10	10 H3SO	3,070000	****	****	****	****		
1	1 HOSO	3,095556	****	****	****	****		
8	8 H2S1	3,185556	****		****	****	****	
6	6 H1S2	3,187778	****		****	****	****	
12	12 H3S2	3,255556			****	****	****	****
9	9H2S2	3,390000				****	****	****
11	11H3S1	3,530000					****	****
7	7H2SO	3,602222						****

Tableau 13 : Résultats de l'ANOVA pour le calcaire total

Univariate Tests of Significance for CalcaireT % (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	16809,20	1	16809,20	5188,833	0,000000
TRAIT	856,88	2	428,44	132,256	0,000000
STRESS	154,14	11	14,01	4,325	0,000062
TRAIT*STRESS	403,53	22	18,34	5,662	0,000000
Error	230,00	71	3,24		

Tableau 14 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur du calcaire total

Tukey HSD test; variable CalcaireT % (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 3,2395, df = 71,000					
Cell No.	TRAIT	CalcaireT % Mean	1	2	3
2	2 D1	8,77917	****		
3	3D2	13,28778		****	
1	1DO	15,65514			****

Tableau 15 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur du calcaire total

Tukey HSD test; variable CalcaireT % (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 3,2395, df = 71,000					
Cell No.	STRESS	CalcaireT % Mean	1	2	3
12	12H3S2	10,82222	****		
4	4H1SO	11,40556	****	****	
6	6H1S2	11,49778	****	****	
1	1HOSO	11,88889	****	****	
8	8H2S1	12,19667	****	****	
5	5H1S1	12,31250	****	****	
11	11H3S1	12,35556	****	****	
2	2HOS1	12,49667	****	****	
3	3HOS2	12,87778	****	****	****
9	9H2S2	13,29000	****	****	****
10	10H3SO	13,86889		****	****
7	7H2SO	15,50444			****

Tableau 16 : Résultats de l'ANOVA pour le carbone total

Univariate Tests of Significance for Carbone total (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	594,4576	1	594,4576	67938,02	0,000000
TRAIT	18,6958	2	9,3479	1068,33	0,000000
STRESS	0,4374	11	0,0398	4,54	0,000033
TRAIT*STRESS	0,9036	22	0,0411	4,69	0,000000
Error	0,6300	72	0,0088		

Tableau 17 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur du carbone total

Tukey HSD test; variable Carbn total (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00875, df = 72,000					
Cell No.	TRAIT	Carbn total Mean	1	2	3
1	1 DO	1,819444	****		
2	2D1	2,382222		****	
3	3D2	2,836667			****

Tableau 18 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur du carbone total

Tukey HSD test; variable Carbn total (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,00875, df = 72,000					
Cell No.	STRESS	Carbn total Mean	1	2	3
11	H3S1	2,240000	****		
1	1HOSO	2,253333	****	****	
10	H3SO	2,280000	****	****	
12	H3S2	2,304444	****	****	****
9	H2S2	2,333333	****	****	****
2	2HOS1	2,345556	****	****	****
4	4H1SO	2,361111	****	****	****
8	H2S1	2,372222	****	****	****
7	H2SO	2,388889	****	****	****
3	3HOS2	2,397778		****	****
6	H1S2	2,433333			****
5	5H1S1	2,443333			****

Tableau 19 : Résultats de l'ANOVA pour la teneur des nitrates dans le sol

Effect	Univariate Tests of Significance for nitrates mg/g sol (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	2245,091	1	2245,091	6274,084	0,000000
TRAIT	411,900	2	205,950	575,543	0,000000
STRESS	20,539	11	1,867	5,218	0,000006
TRAIT*STRESS	40,853	22	1,857	5,189	0,000000
Error	25,406	71	0,358		

Tableau 20 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur des nitrates

Cell No.	TRAIT	nitrates mg/g sol Mean	Tukey HSD test; variable nitrates mg/g sol (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,35784, df = 71,000	
			1	2
1	1DO	3,149714	****	
3	3 D2	3,275000	****	
2	2 D1	7,361944		****

Tableau 21 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur des nitrates

Cell No.	STRESS	nitrates mg/g sol Mean	Tukey HSD test; variable nitrates mg/g sol (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,35784, df = 71,000		
			1	2	3
8	8 H2S1	3,777778		****	
4	4 H1SO	4,250000	****	****	
6	6 H1S2	4,296667	****	****	
7	7H2SO	4,314444	****	****	
5	5H1S1	4,383750	****	****	
9	9 H2S2	4,605556	****	****	****
12	12 H3S2	4,610000	****	****	****
11	11 H3S1	4,615556	****	****	****
3	3HOS2	4,880000	****		****
2	2HOS1	5,018889	****		****
1	1HOSO	5,150000	****		****
10	10 H3S0	5,381111			****

Tableau 22 : Résultats de l'ANOVA pour la hauteur des plantes

Univariate Tests of Significance for hauteur cm (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	24525,52	1	24525,52	17747,11	0,000000
TRAIT	5,72	2	2,86	2,07	0,133586
STRESS	167,78	11	15,25	11,04	0,000000
TRAIT*STRESS	63,72	22	2,90	2,10	0,010076
Error	99,50	72	1,38		

Tableau 23 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la hauteur des plantes

Tukey HSD test; variable hauteur cm (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1,3819, df = 72,000			
Cell No.	TRAIT	hauteur cm Mean	1
1	DO	14,76389	****
3	D2	15,12500	****
2	D1	15,31944	****

Tableau 24 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la hauteur des plantes

Tukey HSD test; variable hauteur cm (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1,3819, df = 72,000						
Cell No.	STRESS	hauteur cm Mean	1	2	3	4
10	H3SO	12,33333				****
7	H1SO	13,72222		****		****
11	H3S1	13,83333		****		****
12	H3S2	14,27778		****	****	
6	H1S2	15,27778	****	****	****	
8	H2S1	15,33333	****	****	****	
2	HOS1	15,38889	****	****	****	
9	H2S2	15,55556	****	****	****	
4	H1O	15,77778	****		****	
5	H1S1	15,88889	****		****	
1	HOSO	16,50000	****			
3	HOS2	16,94444	****			

Tableau 25 : Résultats de l'ANOVA pour la surface des feuilles

Univariate Tests of Significance for SF cm2 (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1,947199E+07	1	19471993	1,041576	0,310920
TRAIT	3,581104E+07	2	17905521	0,957784	0,388644
STRESS	2,025326E+08	11	18412057	0,984879	0,468304
TRAIT*STRESS	4,046238E+08	22	18391989	0,983806	0,494459
Error	1,327326E+09	71	18694734		

Tableau 26 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la surface des feuilles

Tukey HSD test; variable SF cm2 (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1869E4, df = 71,000			
Cell No.	TRAIT	SF cm2 Mean	1
2	2 D1	14,281	****
3	3 D2	15,239	****
1	1DO	1288,568	****

Tableau 27 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la surface des feuilles

Tukey HSD test; variable SF cm2 (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 1869E4, df = 71,000			
Cell No.	STRESS	SF cm2 Mean	1
7	7H2SO	12,433	****
4	4 H1SO	13,789	****
5	5H1S1	13,900	****
11	11 H3S1	14,000	****
3	3HOS2	14,003	****
6	6 H1S2	14,567	****
9	9 H2S2	14,756	****
2	2HOS1	14,840	****
8	8 H2S1	14,878	****
12	12H3S2	15,056	****
1	1HOSO	16,609	****
10	10H3SO	4971,889	****

Tableau 28 : Résultats de l'ANOVA pour la biomasse aérienne

Univariate Tests of Significance for Biomasse maturt (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	706,7140	1	706,7140	18222,98	0,000000
TRAIT	0,3544	2	0,1772	4,57	0,013554
STRESS	75,2369	11	6,8397	176,37	0,000000
TRAIT*STRESS	9,3238	22	0,4238	10,93	0,000000
Error	2,7923	72	0,0388		

Tableau 29 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la biomasse aérienne

Tukey HSD test; variable Biomasse maturt (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,03878, df = 72,000				
Cell No.	TRAIT	Biomasse maturt Mean	1	2
2	D1	2,477222		****
1	DO	2,593889	****	
3	D2	2,603056	****	

Tableau 30 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la biomasse aérienne

Tukey HSD test; variable Biomasse maturt (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,03878, df = 72,000								
Cell No.	STRESS	Biomasse maturt Mean	1	2	3	4	5	6
12	H3S2	1,495556	****					
10	H3SO	1,600000	****					
11	H3S1	1,603333	****					
9	H2S2	1,920000			****			
8	H2S1	2,157778			****	****		
7	H2SO	2,248889				****		
5	H1S1	2,655556		****				
4	H1SO	2,891111		****				
6	H1S2	2,898889		****				
3	HOS2	3,430000					****	
2	HOS1	3,622222					****	
1	HOSO	4,173333						****

Tableau 31 : Résultats de l'ANOVA pour la teneur de la chlorophylle a

Effect	Univariate Tests of Significance for Chloro a (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	180,4097	1	180,4097	610,7434	0,000000
TRAIT	24,9935	2	12,4968	42,3055	0,000000
STRESS	3,4738	11	0,3158	1,0691	0,397988
TRAIT*STRESS	12,8085	22	0,5822	1,9709	0,016713
Error	21,2683	72	0,2954		

Tableau 32 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle a

Tukey HSD test; variable Chloro a (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,29539, df = 72,000				
Cell No.	TRAIT	Chloro a Mean	1	2
1	DO	0,618722		****
2	D1	1,547556	****	
3	D2	1,711111	****	

Tableau 33 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur de la chlorophylle a

Tukey HSD test; variable Chloro a (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,29539, df = 72,000			
Cell No.	STRESS	Chloro a Mean	1
8	H2S1	0,973111	****
3	HOS2	1,051333	****
6	H1S2	1,135222	****
5	H1S1	1,195111	****
2	HOS1	1,215333	****
11	H3S1	1,232667	****
9	H2S2	1,358667	****
10	H3SO	1,382111	****
1	HOSO	1,445000	****
7	H2SO	1,448444	****
12	H3S2	1,496222	****
4	H1SO	1,576333	****

Tableau 34 : Résultats de l'ANOVA pour la teneur de la chlorophylle b

Univariate Tests of Significance for chloro b (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition					
Effect	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	359,7294	1	359,7294	565,5784	0,000000
TRAIT	12,0298	2	6,0149	9,4568	0,000226
STRESS	8,0828	11	0,7348	1,1553	0,333319
TRAIT*STRESS	21,6560	22	0,9844	1,5477	0,085710
Error	45,7947	72	0,6360		

Tableau 35 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle b

Tukey HSD test; variable chloro b (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,63604, df = 72,000				
Cell No.	TRAIT	chloro b Mean	1	2
1	DO	1,373278		****
2	D1	1,932611	****	
3	D2	2,169278	****	

Tableau 36 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur de la chlorophylle b

Tukey HSD test; variable chloro b (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,63604, df = 72,000			
Cell No.	STRESS	chloro b Mean	1
1	HOSO	1,456333	****
12	H3S2	1,498889	****
10	H3SO	1,621778	****
11	11	1,642778	****
5	H3S1	1,697444	****
3	HOS2	1,780556	****
8	H2S1	1,846778	****
7	H2SO	1,922556	****
9	H2S2	1,925556	****
2	HOS1	1,951111	****
6	H1S2	2,037778	****
4	H1SO	2,519111	****

Tableau 37 : Résultats de l'ANOVA pour la teneur de la chlorophylle (a, b)

Effect	Univariate Tests of Significance for cho a et b (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	1049,644	1	1049,644	1330,810	0,000000
TRAIT	71,290	2	35,645	45,193	0,000000
STRESS	12,671	11	1,152	1,460	0,165769
TRAIT*STRESS	36,604	22	1,664	2,110	0,009532
Error	56,788	72	0,789		

Tableau 38 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur de la chlorophylle (a, b)

Tukey HSD test; variable cho a et b (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,78873, df = 72,000				
Cell No.	TRAIT	cho a et b Mean	1	2
1	DO	1,992000		****
2	D1	3,480167	****	
3	D2	3,880389	****	

Tableau 39 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur de la chlorophylle (a,b)

Tukey HSD test; variable cho a et b (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = ,78873, df = 72,000			
Cell No.	STRESS	cho a et b Mean	1
8	H2S1	2,819889	****
3	HOS2	2,831889	****
11	H3S1	2,875444	****
5	H1S1	2,892556	****
1	HOSO	2,901333	****
12	H3S2	2,995111	****
10	H3SO	3,003889	****
2	HOS1	3,166444	****
6	H1S2	3,173000	****
9	H2S2	3,284222	****
7	H2SO	3,371000	****
4	H1SO	4,095444	****

Tableau 40 : Résultats de l'ANOVA pour la teneur relative en eau des feuilles

Effect	Univariate Tests of Significance for TRE% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Sigma-restricted parameterization Effective hypothesis decomposition				
	SS	Degr. of Freedom	MS	F	p
Intercept	207175,3	1	207175,3	94802,80	0,000000
TRAIT	138,0	2	69,0	31,57	0,000000
STRESS	462,1	11	42,0	19,22	0,000000
TRAIT*STRESS	208,7	22	9,5	4,34	0,000001
Error	155,2	71	2,2		

Tableau 41 : Les groupes obtenus de l'effet traitement biochar sur la teneur relative en eau des feuilles

Cell No.	TRAIT	TRE% Mean	Tukey HSD test; variable TRE% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 2,1853, df = 71,000		
			1	2	3
1	1DO	42,75714	****		
2	2D1	44,00556		****	
3	3D2	45,54444			****

Tableau 42 : Les groupes obtenus de l'effet stress sur la teneur relative en eau des feuilles

Cell No.	STRESS	TRE% Mean	Tukey HSD test; variable TRE% (Spreadsheet1 BOUKHQRI ET LOUAY) Homogenous Groups, alpha = ,05000 Error: Between MS = 2,1853, df = 71,000				
			1	2	3	4	5
12	12H3S2	40,75556			****		
11	11H3S2	41,61111		****	****		
9	9H2S2	42,50000	****	****	****		
10	10H3SO	43,01111	****	****	****		
5	5H1S1	43,33750	****	****			
8	8H2S1	43,46667	****	****			
7	7H2SO	43,92222	****	****		****	
4	4H1SO	44,65556	****			****	
6	6H1S2	44,78889	****			****	
3	3HOS2	46,08889				****	****
2	2HOS1	47,22222					****
1	1HOSO	47,93333					****

