

Effet du mode de semis, du précédent cultural et de la fertilisation azotée sur l'évolution du carbone et de l'azote du sol au cours d'un cycle de production d'une culture de fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L)

M. MECHRI^{1,2*}, W. SAIDI^{3,4}, R. HAJRI^{3,5}, N. HALOU¹, T. JARRAHI², M.A. HANACHI², A. GHARBI⁴, N. JEDIDI⁶

¹Institut National Agronomique de Tunisie

²Institut National des Grandes Cultures

³Institut Supérieur Agronomique de Chott Mariem

⁴Ecole Supérieure d'Agriculture du Kef

⁵Pôle Régional de Recherche et de Développement Agricoles du Nord Ouest

⁶Centre de Recherches et des Technologies des Eaux

*Auteur de correspondance: mouna.mechri@hotmail.fr

Abstract - This study assessed the effects of tillage (conventional tillage or no-till), of the pre-crop and N fertilization (0, 20, or 40 kg N·ha⁻¹) on the rate and the evolution of the soil organic carbon and soil nitrogen during a vegetative cycle of a fenugreek crop, soil samples were collected at depth (0-20 cm) in September 2013 from Tunisian semi-arid region of an experimental rotation faba bean /oat and faba bean/durum wheat), the soil is collected after the durum wheat and the oat harvest. Collected soil samples were sowed in pots by fenugreek and arranged in Randomized complete block design 84 and 165 days after the sowing, we made analyzes for the carbon, the total nitrogen and NO₃-N and NH₄-N. The highest NO₃- N content during the blooming was registered in pots filled by the soil, of no till after durum wheat crop fertilized by 40 kg of N, the lower content was registered at the treatments of conventional tillage after oat crop not fertilized, all the soil chemical parameters except the NH₄-N during the blooming and the electric conductivity in the harvest were influenced by the interaction tillage and pre-crop.

Keywords: Fenugreek, Carbon, nitrogen fertilization, conventional tillage, no till, pre-crop

Résumé - La présente étude vise l'évaluation de l'impact du travail du sol (semis direct ou semis conventionnel), du précédent cultural et de la fertilisation azotée N (0, 20 ou 40 kg N. ha⁻¹) sur la teneur et l'évolution du carbone organique et de l'azote du sol au cours d'un cycle végétatif d'une culture de fenugrec. Des échantillons de sol ont été prélevés d'une profondeur de (0-20 cm) d'une région du semi-aride tunisien d'une parcelle expérimentale de rotation (fève- avoine et fève- blé dur) ; le sol est récupéré des deux phases après récolte du blé dur et de l'avoine en septembre 2013. Le sol en question était semé par le fenugrec et disposé en bloc aléatoire complet ; 84 et 165 jours après le semis, on a fait les analyses pour le carbone, l'azote total, nitrique et ammoniacal. L'analyse statistique a montré que seule la teneur de l'azote nitrique pendant la floraison a été influencée significativement (P= 0,0024) par l'interaction des trois facteurs étudiés. En effet, la teneur la plus élevée de l'azote nitrique pendant la floraison était enregistrée dans les pots remplis de sol de semis-direct, après une culture de blé dur fertilisés par 40 kg d'N (99,2±9 mg.kg⁻¹) ; la teneur la moins élevée était enregistrée chez les traitements de semis-conventionnel après une culture d'avoine non fertilisée (15,1± 2,49mg.kg⁻¹). Le carbone organique du sol, l'azote total, l'azote nitrique et l'azote ammoniacal pendant la récolte ont été influencés par l'interaction travail du sol et le précédent cultural, la valeur du carbone à la récolte la plus élevée était enregistrée dans les pots remplis par le sol collecté du précédent cultural blé et ayant le semis direct comme travail du sol (1,45% ±0,04), la valeur la moins élevée était enregistrée dans les pots remplis par le sol collecté du précédent cultural avoine ayant le semis conventionnel comme travail du sol (1,12 % ± 0,06).

Mots clés : Fenugrec, Carbone, fertilisation azotée, travail du sol, précédent cultural



1. Introduction

Le fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L.) est une légumineuse annuelle dont la culture est étendue dans les régions méditerranéennes (Desperrier et al. 1985). Il est parmi les plantes médicinales les plus connues et les plus rustiques qui ont été utilisées dans la médecine traditionnelle dans beaucoup de pays du monde (Wierzbowska et Żuk-Gołaszewska. 2014). Le fenugrec nodule par la bactérie *Rhizobium meliloti* (Desperrier et al. 1985). La fertilisation azotée du fenugrec engendre l'accélération de croissance, la maturation, favorisant la production de la biomasse et développe la couleur vert foncé (Petropoulos et al. 2002). La matière organique (MO) peut constituer un des indicateurs de la fertilité d'une parcelle pour évaluer les effets d'un système de culture. En effet, elle joue un rôle important dans de nombreuses propriétés du sol et détermine donc partiellement la conservation de la ressource sol et la productivité végétale (Feller 1995). La MO est la source principale d'azote dans le sol. C'est un composant labile nécessitant une source de renouvellement. Toutefois, la perturbation du sol par le labour provoque généralement une diminution du taux de la MO, favorise l'érosion éolienne et hydrique et de ce fait provoque un déclin de la productivité de la plante cultivée (Recous 2001). Ainsi, il devient nécessaire de maintenir et même d'augmenter le contenu de des sols en MO pour améliorer leur fertilité et assurer une agriculture durable en augmentant le taux de séquestration des résidus de récolte (Unger 1994).

L'azote (N) occupe une position unique parmi les éléments essentiels parce que les cultures en exigent proportionnellement plus que d'autres éléments nutritifs pour atteindre le rendement maximal. La connaissance de la disponibilité de l'azote durant le cycle de croissance est essentielle pour améliorer l'efficacité d'utilisation d'engrais et minimiser les impacts défavorables de pertes d'N dans l'environnement (St Luce 2011).

La quantité de résidu de cultures apportée par les cultures peut affecter l'augmentation de matière organique de sol. Une relation intime a été observée par Testa et al. (1992) et Teixeira et al. (1994) entre l'apport des résidus de culture pendant 5 ans et les teneurs du carbone et d'N dans un Acrisol conduit en mode semis-direct au Brésil. D'autres auteurs ont aussi souligné l'importance de l'apport des résidus de cultures dans la restauration de la MO du sol (Angers et al. 1997 ; Janzen et al. 1998).

Bien que l'augmentation de la MO du sol est généralement observée sous le mode non labour et des systèmes de cultures ayant une biomasse importante de résidu, l'augmentation de la MO dépend aussi d'autres facteurs comme le climat, principalement la température (Alvarez et Lavado. 1998).

Les légumineuses sont connues par la fixation biologique de l'azote N_2 , fournissant ainsi de l'N supplémentaire au système ; jusqu'à 150 kg d'N par ha par an peuvent être biologiquement fixés par des légumineuses selon l'année et l'espèce de légumineuse (Mueller et Thorup-Kristensen. 2001). Ceci peut représenter presque 50 % de l'N total utilisé en agriculture (Graham 2005).

Le rôle des rotations des cultures dans la fourniture du sol en azote dépend de la facilité de la décomposition liée au rapport C : N, NO_3-N et des composés solubles à l'eau produits du résidu de culture (Sharifi et al. 2009; Thorup-Kristensen et al. 2003). La fourniture du sol en N en une année déterminée, dépend de la culture installée, des pratiques de labour, des propriétés de sol et des conditions environnementales (Sharifi et al. 2009 ; Thorup-Kristensen et al. 2003). L'apport des engrais azotés et de fumier stimulent la dénitrification en augmentant NO_3-N et la disponibilité du Carbone. Au Québec, une augmentation de la fertilisation azotée de 120 à 180 kg N ha⁻¹ a abouti à une dénitrification de 40-130 % et une émission de N_2O de 50-200 % (Chantigny et al. 1998).

L'objectif du présent travail est donc d'étudier l'effet du travail du sol, des précédents culturaux et de la fertilisation azoté sur le carbone et l'azote du sol au cours d'un cycle de production d'une culture de fenugrec.

2. Matériels et méthodes

Un essai est conduit en pots sur une espèce du fenugrec de la famille des légumineuses (*Foenum-graecum* L.) adaptée aux régions méditerranéennes. Le protocole expérimental était disposé en blocs aléatoires complets à trois répétitions ; chaque pot était rempli avec cinq Kg de sol collecté de la région du Krib au nord du gouvernorat de Siliana appartenant à l'étage bioclimatique semi-aride supérieur. Le contenu de chaque pot est constitué d'un mélange de 4/5 du sol collecté au niveau du site et 1/5 du sable.

Les traitements sont des combinaisons de deux travaux du sol semis direct et semis conventionnel avec deux précédents culturaux blé dur et avoine et trois doses de nitrate d'ammonium ($N1=0$ et

$N_2 = 20 \text{ kg N ha}^{-1} = 60 \text{ Kg nitrate d'ammonium ha}^{-1} = 0,12 \text{ g pot}^{-1}$ et $N_3 = 40 \text{ kg N ha}^{-1} = 120 \text{ Kg nitrate d'ammonium ha}^{-1} = 0,24 \text{ g pot}^{-1}$, cette combinaison a été doublée pour permettre un échantillonnage destructif l'un au stade de 50% floraison (84 jours après le semis) et l'autre lors de la récolte (165 jours après le semis).

L'essai a été installé en plein air sur un sol sablo-limoneux dans la station expérimentale de l'École Supérieure d'Agriculture du Kef au cours de la campagne agricole 2013/2014. Le climat de la région du Kef appartient à l'étage bioclimatique semi-aride moyen à hiver froid et humide et à été sec et chaud. La pluviométrie annuelle de cette région varie entre 200 et 600 mm, les propriétés chimiques des sols étudiés sont présentées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Propriétés chimiques des sols étudiés

sol	pH	COS (%)	N (mg.kg ⁻¹)	C/N	NH ₄ (mg. kg ⁻¹)	NO ₃ (mg. kg ⁻¹)	P (mg. kg ⁻¹)	K (mg. kg ⁻¹)	CE (ms/m)
PC. Blé	7,34± 0,15	1,08±0,02	525±5,29	20,57±0,55	11,4± 0,4	24,8±3,9	9,15± 0,87	182,4± 13,89	1,29± 0,13
SC Blé	7,3±0,1	1,41±0,04	1080±20,5	13,05±0,61	18,8± 1,12	49,6± 1,98	21,8± 2,41	273,6± 21,09	1,42± 0,09
PC. Avoine	7,73± 0,07	1,08±0,02	605±4,35	16,61±0,3	9,2± 0,78	12,4± 0,98	10,9± 1,92	304± 12,2	1,18± 0,087
SC Avoine	7,7± 0,04	1,29±0,02	741±8,18	17,4±0,54	17,9± 1,05	37,2± 4,21	10,9± 2,01	304± 17,31	1,30±0,1
SD									

PC : précédent cultural ; SC : semis conventionnel ;SD :semis direct

Les échantillons de sol ont été prélevés en Septembre 2013. Des parcelles avec le blé dur et l'avoine comme précédents culturaux qui sont conduits en semis direct et semis conventionnel. Le sol collecté d'un site de la région du Krib d'une expérience de rotation conduite en partie par l'INGC depuis 2000 (fève/ blé dur et fève/avoine) le sol est récupéré après récolte du blé dur et de l'avoine. Pour les traitements semis direct le sol est récupéré avec les résidus de cultures qui sont incorporés lors du semis en pots. Les prélèvements ont été effectués à des profondeurs de (0-20 cm). Après prélèvement, les échantillons ont été caractérisés, sol peu évolué, d'apport alluvial, à texture hétérogène sablo-limoneuse avec des teneurs en sable jusqu'à 78,45%, en argile jusqu'à 11,2 %, et en limon de 10,95%. L'analyse granulométrique était faite par la méthode densimétrique (Bouyoucos 1962) ; le pH est mesuré sur une suspension de sol dans l'eau (20g de sol dans 50ml d'eau distillée) après agitation pendant 2 h et un état stationnaire de 30 mn en utilisant un pH-mètre (Rouiller 1986). Le carbone par la méthode de Walkely and Black (Nelson et Sommers. 1982), l'azote total, ammoniacal et nitrique par la méthode de Kjeldahl (Jones et al. 1991), le phosphore assimilable par la technique d'Olsen (Bray 1945) et enfin le potassium échangeable par photométrie à flamme (Schollenberger 1945). La conductivité électrique (CE) est mesurée avec un conductimètre directement sur la suspension sol-eau, après agitation pendant 1 heure, une décantation suivie d'une filtration (Rouiller 1986).

Les semences de fenugrec étaient semées à la main le 1^{er} janvier 2014 à raison de 10 grains pot⁻¹. A la levée, le nombre de plants dans chaque pot était réduit à trois et les irrigations étaient réalisées avec des doses homogènes d'eau chaque fois que le sol commençait à se dessécher. Les mauvaises herbes étaient supprimées manuellement dès leur apparition,

Pendant le stade de montaison ; 40 jours après le semis, le sol de chaque pot était analysé pour le carbone, l'azote total, ammoniacal et nitrique. Pendant ce stade, le nombre de plants dans chaque pot était réduit à un.

Après la récolte ; 165 jours après le semis, un échantillon de sol était collecté de chaque pot pour analyse chimique et la conductivité électrique.

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel SAS (SAS Institute 2001). Elle s'est basée sur l'analyse de la variance (ANOVA) à trois facteurs : pratique culturale (SD et SC), précédent cultural (blé dur et avoine) et la fertilisation azotée (0, 20 ou 40 kg N. ha⁻¹). Cette analyse a été réalisée sur 5 paramètres (le carbone organique du sol, l'azote total, l'azote nitrique, l'azote ammoniacal et la conductivité électrique). Au terme de cette analyse, pour tout effet principal significatif, les moyennes ont été comparées en utilisant le test de Student-Newman-Keuls (SNK) avec un seuil de 5%.

Une autre analyse de variance était réalisée pour tester l'effet de la fertilisation azotée sur les mêmes paramètres en fixant les deux facteurs ensemble (pratiques culturales et précédent cultural) sur tous les paramètres. Les moyennes étaient séparées selon la méthode des SNK.

3. Résultats et discussion

L'analyse de la variance est rapportée dans le tableau 2 et les résultats de l'analyse chimique sont rapportés dans le tableau 3.

Tableau 2 : Analyse de la variance (ANOVA) des propriétés chimiques du sol selon le travail du sol, le précédent de

	COS 84	NT 84	NO ₃ 84	NH ₄ 84	COS	NT 165	NO ₃ 165	NH ₄ 165	CE 165
PC	0,0435	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,0001	<0,0001	<0,0001	0,0089	<0,0001
WS	0,0034	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
N	ns	0,005	<0,0001	<0,0001	ns	ns	<0,0001	0,0115	0,0270
PC*WS	0,0094	<0,0001	<0,0001	ns	<0,0001	<0,0001	0,0027	0,0493	ns
PC*N	ns	ns	0,0019	ns	ns	ns	ns	ns	ns
WS*N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
PC*WS*N	ns	ns	0,0024	ns	ns	ns	ns	ns	ns

COS : carbone organique du sol ; NT: azote total; NO₃ : azote nitrique; NH₄ : azote ammoniacal; CE : conductivité électrique; 84: 50 % floraison; 165 : récolte ; ns : non significatif au seuil de 5%

PC=Précédent cultural, WS = travail du sol, N= fertilisation azotée, (*) = interaction, ns = non significatif au seuil de 5 %

Tableau 3 : Les paramètres chimiques du sol selon le précédent cultural, le travail du sol la fertilisation azotée et leur

	COS	NT 84	NO ₃ 84	NH ₄ 84	COS	NT 165	NO ₃ 165	NH ₄ 165	CE 165
PC									
Blé dur	1,24a	800,33a	56,84a	14,91a	1,31a	835,61a	46,34a	16,09a	1,32a
Avoine	1,17b	679,39b	36,23b	13,16b	1,20b	687,06b	30,73b	14,97b	1,24b
WS									
SD	1,26a	912,89a	61,22a	16,85a	1,33a	942,89a	52,34a	18,93a	1,34a
SC	1,15b	566,83b	31,85b	11,21b	1,17b	579,78b	24,73b	12,13b	1,22b
Azote (N)									
N1	1,16a	714,83b	33,88c	12,15b	1,26a	752,17a	32,07c	14,68b	1,25b
N2	1,23a	753,00a	45,92b	14,57a	1,24a	767,92a	38,07b	15,66ab	1,28ab
N3	1,24a	751,75a	59,81a	15,38a	1,26a	763,92a	45,48a	16,26a	1,30a
PC*WS*N									
SD/B									
N1	1,23b	1037b	53,40c	16,19a	1,41a	1103a	50,90c	18,45a	1,36a
N2	1,44a	1102a	74,57b	18,06a	1,42a	1152a	63,27b	19,31a	1,38a
N3	1,37a	1091,67a	99,23a	19,75a	1,46a	1138,67a	73,10a	19,49a	1,40a
SC/B									
N1	1,07a	504,67a	27,10b	10,39c	1,20a	533a	25,07a	12,07b	1,22a
N2	1,20a	537a	37,20a	12,01b	1,15a	547a	29,20a	12,81b	1,28a
N3	1,15a	529,67a	49,57a	13,05a	1,21a	540a	36,53a	14,42a	1,27a
SD/A									
N1	1,24a	721,67a	39,90c	13,56a	1,26a	753,67a	39,10a	17,95b	1,26a
N1	1,07b	758,33a	46,93b	16,48a	1,21a	750,33a	40,20a	19,16a	1,30a
N1	1,24a	766,67a	53,29a	17,06a	1,25a	759,67a	47,47a	19,23a	1,31a
SC/A									
N1	1,09b	596a	15,10c	8,44b	1,17a	619a	13,20b	10,26b	1,17a
N2	1,20a	614,67a	24,97b	11,73a	1,17a	622,33a	19,60a	11,36a	1,18a
N3	1,21a	619a	37,16a	11,66a	1,12a	617,33a	24,80a	11,88a	1,21a

COS : carbone organique du sol ; NT: azote total; NO₃ : azote nitrique; NH₄ : azote ammoniacal; CE : conductivité électrique; 84: 50 % floraison; 165 : récolte
 Dans la même colonne, les valeurs ayant la même lettre ne diffèrent pas significativement selon le test de SNK (P=0,05)

3.1. Le carbone organique du sol

Le carbone organique du sol (COS) à l'installation de l'essai, était compris entre $1,08 \pm 0,02$ et $1,41 \pm 0,04$ % (Tableau 1). Pour le sol conduit en semis conventionnel pour les deux précédents culturaux cette teneur était de 1,08 %. Pour le sol collecté après avoine conduit en semis direct la teneur du COS est supérieure aux sols du semis conventionnels de 19,4 % le sol collecté après blé dur conduit en mode semis direct et de 30,5% par rapport au semis conventionnel. 84 jours après le semis de fenugrec, pendant le stade 50% floraison, le COS était influencé significativement par le précédent cultural, le travail du sol et leur interaction. Pendant la récolte, l'analyse statistique a montré que le précédent cultural, le travail du sol et leur interaction avaient des effets très hautement significatifs sur le COS (Tableau 2). Le maintien des résidus de récolte en surface du sol peut contribuer à la synthèse d'une nouvelle MO (Campbell et Zentner. 1993). Dans les zones semi-arides où la décomposition de la MO est influencée par les conditions de sécheresse (Campbell et al 1996), l'adoption du non labour réduit l'évaporation et par conséquent les pertes en eau, améliore les rendements et favorise l'accumulation de la MO par l'incorporation des résidus de récolte (Campbell et Janzen. 1995).

Pendant le stade 50% floraison, le sol collecté après blé dur contient 1,24 % du COS alors que le sol collecté après avoine contient 1,17% du COS et ceux conduits en mode semis direct et en semis conventionnel en contiennent respectivement 1,26 et 1,15 %. Le carbone organique total dans le sol est plus élevé dans les couches sous le non labour (Saber et Mrabet. 2002).

Pour le sol collecté après blé dur et conduit en mode semis direct, on a observé que la fertilisation azotée a influencé significativement la teneur du COS ($P=0,0037$). Les pots fertilisés par l'équivalent de 20 et 40 kg d'N par hectare contiennent des teneurs similaires et les pots non fertilisés ont enregistré les teneurs les moins élevées. L'apport des engrais azotés et de fumier stimulent la dénitrification en augmentant $\text{NO}_3\text{-N}$ et la disponibilité du Carbone (Chantigny et al.1998). Pendant la récolte, on n'a pas observé des différences pour ce paramètre ($P=0,3474$). Le reliquat en COS est sensiblement égal à la teneur initiale avec un léger déclin pour les pots non fertilisés et une légère augmentation pour les pots fertilisés.

Pour le sol collecté après blé dur conduit en mode semis conventionnel, la fertilisation, n'avait aucun effet sur le COS ni pendant le stade 50% floraison ($P=0,4406$) ni pendant la récolte ($P=0,4793$). Les reliquats en COS sont supérieurs aux teneurs initiales avec une légère augmentation pour les pots fertilisés par une dose équivalente à 40 kg par hectare et les pots non fertilisés.

Concernant le sol récolté après une culture d'avoine conduit en semis direct, la fertilisation a influencé la teneur du COS seulement au stade 50 % floraison ($P<0,0001$). En effet, les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les pots non fertilisés ou fertilisés par l'équivalent de 40 kg d'N par hectare. La dose 20 kg d'N par hectare a donné la teneur du COS la moins élevée. Une chute des teneurs du COS est observée pendant la récolte par rapport à la teneur initiale. Finalement pour le sol récolté après avoine et conduit en mode de semis conventionnel, la COS a été influencée par la fertilisation azotée pendant le stade 50% floraison ($P=0,0002$). En effet, les doses 20 et 40 kg d'N par hectare ont permis de donner les teneurs les plus élevées de COS (Figure 1). Les reliquats en COS sont supérieurs aux teneurs initiales pour toutes les doses d'azote appliquées. Ces résultats inhérents aux reliquats sont en contradiction avec eux trouvés par Mrabet et al (2001) qui révèlent que le labour conventionnel continu diminue la teneur du COS indépendamment de la rotation de culture adoptée.

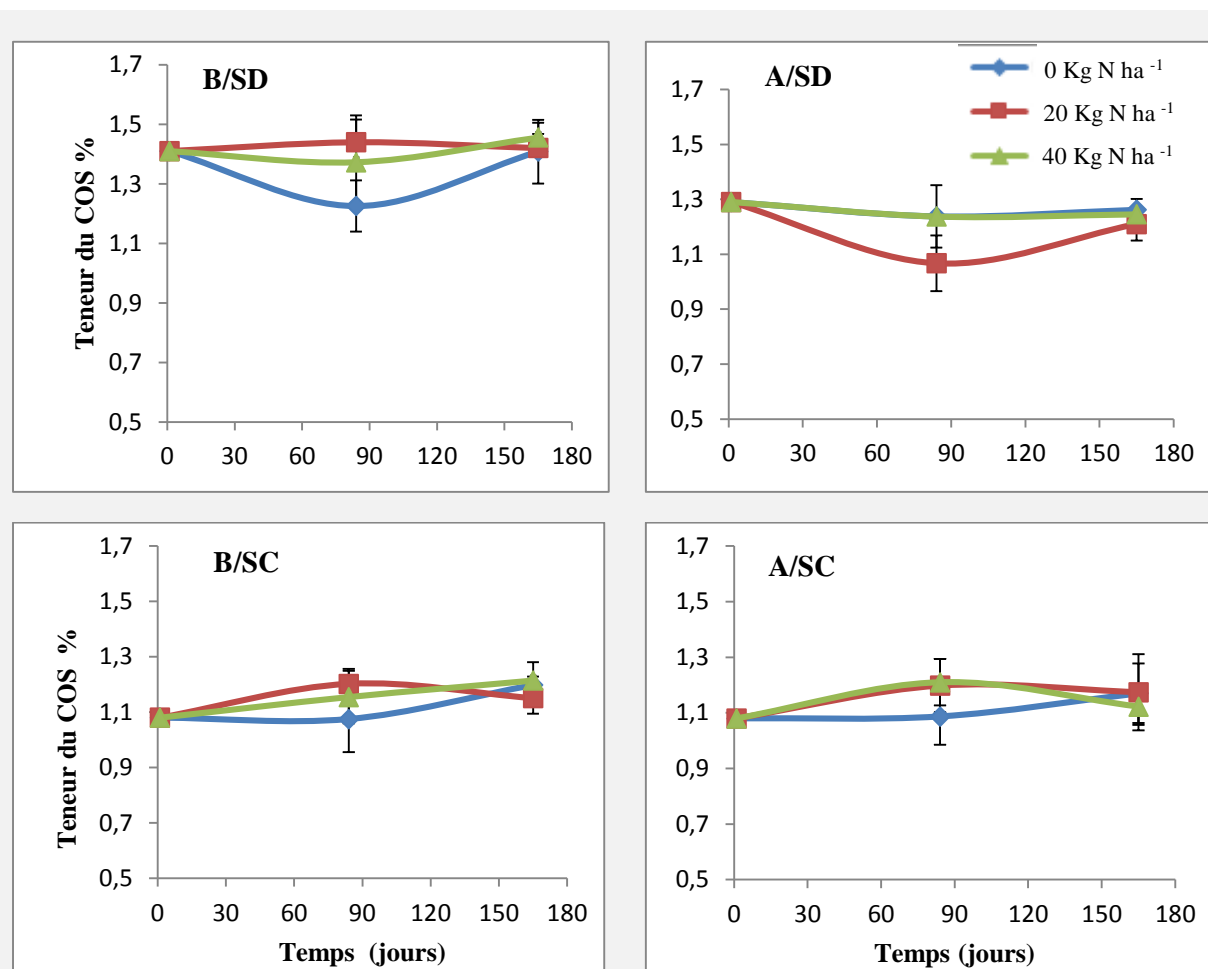


Figure 1 : Evolution de la teneur du carbone organique du sol selon le mode du travail du sol, le précédent cultural et la fertilisation azotée

B : Blé dur ; **A** : Avoine; **SC**: semis conventionnel; **SD**: semis direct

3.2. L'azote total du sol

A l'installation de l'essai, l'azote total du sol (NT) était compris entre $525 \pm 5,29$ et $1080 \pm 20,5$ mg.kg^{-1} . En effet, la teneur de l'NT du sol conduit en semis conventionnel collecté après blé dur était égale à 525 mg.kg^{-1} et celui collecté après avoine la teneur était égale à $605 \pm 4,35 \text{ mg.kg}^{-1}$. Pour le sol conduit en semis direct collecté après avoine, la teneur de l'NT était supérieure à celle du sol conduit en semis conventionnels de 22,47 %. La teneur du sol collecté après blé dur conduit en mode semis direct est supérieure de 100,7% par rapport au semis conventionnel (Tableau 1). L'azote total est influencé par le labour et la rotation des cultures (Saber et Mrabet. 2002). Quatre-vingt-quatre jours après le semis du fenugrec, pendant le stade 50% floraison, l'NT était influencé significativement par le précédent cultural, le travail du sol, leur interaction et par la fertilisation azotée, en effet les pots remplis par le sol collecté du précédent cultural blé dur contiennent $800,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote, ceux remplis par le sol collecté du précédent cultural avoine en contiennent $679,39 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote; les pots remplis du sol conduit en mode semis direct contiennent $912,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote, ceux remplis du sol conduits en mode semis conventionnel en contiennent $566,8 \text{ mg.kg}^{-1}$ d'azote. Les doses équivalentes à 20 et 40 kg d'azote ont donné des taux d'azote similaires qui sont égales à 753 et 751 mg.kg^{-1} respectivement tandis que le sol non fertilisé contient $714,8 \text{ mg.kg}^{-1}$.

Pendant la récolte, l'analyse statistique a montré que le précédent cultural, le travail du sol et leur interaction avaient un effet très hautement significatif sur l'NT, en effet le sol collecté après blé dur a permis de donner le taux le plus élevé de l'azote qui est égale à 835,6 mg.kg⁻¹ et le sol collecté après avoine a permis de donner une teneur moins élevée qui est égale à 687,06 mg.kg⁻¹. Le sol conduit en mode semis direct a permis de donner la teneur la plus élevée (942,89 mg.kg⁻¹), le sol conduit en mode semis conventionnel a permis de donner le taux le moins élevé(579,78). (Tableau 2). Pendant le stade de 50% floraison, la fertilisation azotée avait un effet significatif seulement sur le sol collecté après blé dur conduit en mode semis direct, (P=0,0001), en effet, les doses 20 et 40 kg ha⁻¹ ont permis d'augmenter la teneur initiale de l'azote total alors qu'une diminution de la teneur initiale était enregistrée pour les pots non fertilisés. Pendant la récolte, la fertilisation azotée n'avait aucun effet sur ce paramètre. Toutefois, les reliquats en NT sont supérieurs aux teneurs initiales pour tous les traitements, les légumineuses sont connues par la fixation biologique de l'azote N₂, ainsi, fournissant de l'N supplémentaire au système, jusqu'à 150 kg d'N par ha par an peuvent être biologiquement fixé par des légumineuses selon l'année et l'espèce de légumineuse (Mueller et Thorup-Kristensen. 2001). (Figure 2).

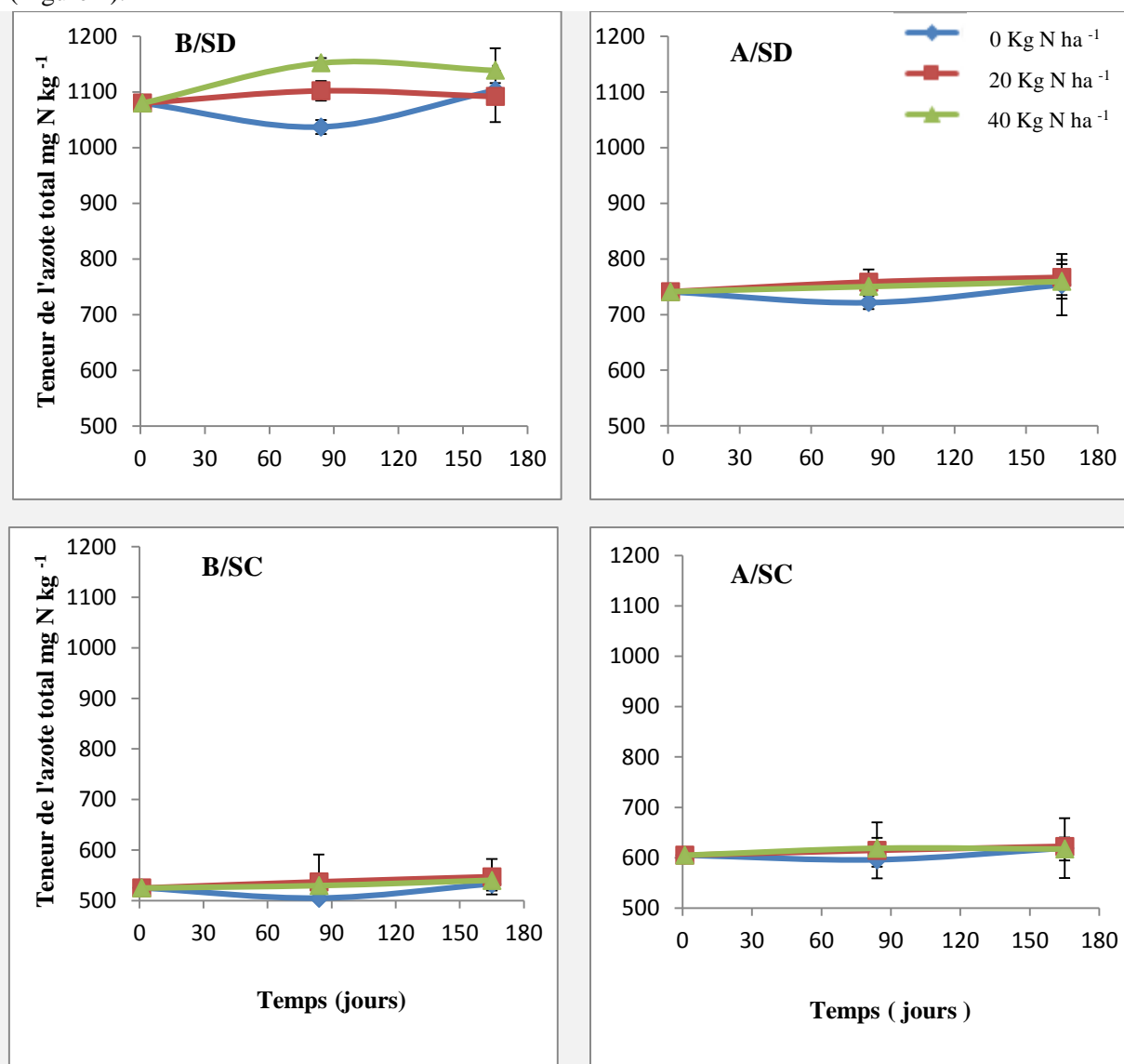


Figure 2 :Evolution de la teneur de l'azote total du sol selon le mode du travail du sol, le précédent cultural et la fertilisation azotée

B : Blé dur ; **A** : Avoine; **SC**: semis conventionnel; **SD**: semis direct

3.3. L'azote nitrique du sol

L'azote nitrique au début de l'essai était compris entre $12,4 \pm 0,98$ et $49,6 \pm 1,98$ mg.kg^{-1} (Tableau 1) ; le sol collecté après avoine et conduit en semis conventionnel contient $12,40$ mg.kg^{-1} . Pour le sol collecté après avoine conduit en semis direct, la teneur du NO_3 est presque triple par rapport aux sols du semis conventionnels. Le sol collecté après blé dur conduit en mode semis conventionnel contient $24,8 \pm 3,9$ mg.kg^{-1} et le sol collecté après blé dur et conduit en mode semis direct contient presque le double de celui conduit en semis conventionnel. Quatre-vingt-quatre jours après semis de fenugrec, pendant le stade 50% floraison, les analyses statistiques ont montré que la teneur du sol en NO_3 est influencée significativement par le précédent cultural, le travail du sol et leur interaction, la fertilisation azotée, l'interaction précédent cultural et fertilisation azotée et l'interaction précédent cultural, travail du sol et fertilisation azotée. Pendant la récolte, l'analyse statistique a montré que le précédent cultural, le travail du sol et leur interaction et la fertilisation azotée avaient un effet très hautement significatif sur le NO_3 (Tableau 2). Pendant le 50% floraison, le sol collecté après blé dur contient $56,84$ mg.kg^{-1} du NO_3 , alors que pour le sol collecté après avoine contient $36,23$ mg.kg^{-1} du NO_3 . Le sol conduit en mode semis direct contient $61,22$ mg.kg^{-1} du NO_3 et le sol conduit en semis conventionnel en contient $31,85$ mg.kg^{-1} . Les pots non fertilisés contiennent $33,88$ mg.kg^{-1} du NO_3 , les pots fertilisés par l'équivalent de 20 kg par hectare contiennent $45,92$ mg.kg^{-1} du NO_3 et ceux fertilisés par l'équivalent de 40 kg par hectare contiennent $59,81$ mg.kg^{-1} . Après la récolte, on a observé une diminution de la concentration de NO_3 pour tous les facteurs mais avec la même allure (Tableau 3). Ce changement des teneurs du NO_3 selon le mode de gestion du sol est peut être expliqué par le changement des propriétés chimiques du sol à savoir le pH, la conductivité électrique (CE), le rapport C :N de la matière organique apportée et la teneur de la MO qui peuvent avoir un impact sur la fourniture de l'azote (Dharmakeerthi et al. 2005; Subbarao et al. 2006) en influençant l'activité des micro-organismes et la concentration du NH_4^+ et NO_3^- dans la solution du sol. Pathak et Rao (1998) ont conclu que la minéralisation nette de l'azote a diminué avec un pH et un taux de salinité élevés. Le labour a un impact variable sur la lixiviation de $\text{NO}_3\text{-N}$. Certaines études ont rapporté que la lixiviation de $\text{NO}_3\text{-N}$ est élevée dans les sols conduits en mode sans labour comparés par ceux conduits en mode labour conventionnel (Tan et al. 2002) ça peut être expliqué par la formation des macropores continus dans le sol qui augmentent le mouvement $\text{NO}_3\text{-N}$ par le flux préférentiel, d'autres études ont rapporté que la lixiviation de $\text{NO}_3\text{-N}$ est plus accentuée en mode labour conventionnel, est expliqué par la dénitrification élevée dans les sols conduits en mode de semis-direct (Mkhabela et al. 2008), l'infiltration supérieure dans sols labourés (Drury et al. 1993), ou l'augmentation de la minéralisation de l'azote dans sols labourés (Constantin et al. 2010), tandis que certains n'ont rapporté aucune différence (Fuller et al 2010; Stoddard et al. 2005). Pour le sol collecté après blé dur et conduit en mode semis direct, pendant le stade 50% floraison, on a observé que la fertilisation azotée a influencé significativement la teneur du NO_3 ($P < 0,0001$). Les pots fertilisés par l'équivalent de 40 kg d'N par hectare contiennent $99,23$ mg.kg^{-1} ; les pots non fertilisés ont enregistré les teneurs les moins élevées ($53,40$ mg.kg^{-1}). Ces teneurs sont supérieures à la concentration de NO_3 enregistrée au début de l'essai. Pendant la récolte, les reliquats en NO_3 sont influencés par la fertilisation azotée. Les pots fertilisés par 40 kg d'N contiennent $73,1$ mg.kg^{-1} ; les pots non fertilisés contiennent $50,90$ mg.kg^{-1} . Ces valeurs sont inférieures à celles enregistrées pendant la floraison mais supérieures à la concentration initiale du NO_3 . Pour le sol collecté après blé dur conduit en mode semis conventionnel la fertilisation avait un effet significatif sur la teneur du NO_3 pendant le stade 50 % floraison ($P = 0,012$) ; la valeur la plus élevée était observée dans les pots fertilisés par l'équivalent de 40 kg d'N ($49,57$ mg.kg^{-1}). Les pots non fertilisés contiennent $27,1$ mg.kg^{-1} ; ces valeurs sont supérieures à celles enregistrées à l'installation de l'essai. Pendant la récolte, aucune différence n'a été notée ($P = 0,0679$). Une diminution de la teneur en NO_3 a été observée par rapport au stade 50 % floraison, mais les reliquats sont supérieurs aux valeurs enregistrées avant le semis. Concernant le sol récolté après une culture d'avoine conduit en semis direct, la fertilisation a influencé la teneur du NO_3 seulement au stade 50% floraison ($P < 0,0001$). En effet, les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les pots fertilisés par l'équivalent de 40 kg d'N par hectare ($53,29$ mg.kg^{-1}). Les pots non fertilisés contiennent ($39,90$ mg.kg^{-1}) ; ces valeurs sont également supérieures à celles enregistrées au début de l'installation de l'essai. Une augmentation des teneurs de la teneur de NO_3 est observée pendant la récolte par rapport à la teneur initiale. Finalement pour le sol récolté après avoine et conduit en mode de semis conventionnel, le NO_3 a été influencé par la fertilisation azotée pendant le stade 50

% floraison ($P=0,0053$). En effet, la dose 40 kg d’N par hectare a permis de donner la teneur la plus élevée ($37,16 \text{ mg.kg}^{-1}$), la teneur la moins élevée ayant été observée pour les sols non fertilisés ($15,10 \text{ mg.kg}^{-1}$). Ces valeurs sont supérieures à la teneur initiale. Pendant la récolte, les reliquats en NO_3 étaient influencés par la fertilisation azotée ($P=0,0119$). La dose d’azote de 40 kg par hectare a donné la teneur la plus élevée ($24,8 \text{ mg.kg}^{-1}$) ; les pots non fertilisés contiennent $13,20 \text{ mg.kg}^{-1}$. Ces valeurs sont inférieures à celles enregistrées pendant le stade 50% floraison (figure 3). Les reliquats en NO_3 sont supérieurs aux teneurs initiales pour toutes les doses appliquées d’azote. L’augmentation de la teneur du NO_3 à la récolte confirme les résultats de (Stark et Porter 2005; Thorup-Kristensen et al. 2003; Zebarth et Rosen. 2007). qui ont signalé l’importance des cultures de légumineuse dans l’augmentation de la fourniture en azote du sol, mais leurs impacts varient largement d’une année à l’autre et de types de sol et selon les espèces de légumineuse en raison de la capacité de la fixation de N_2 , la structure des racines, la biomasse de plante, le rapport C :N et la gestion des cultures

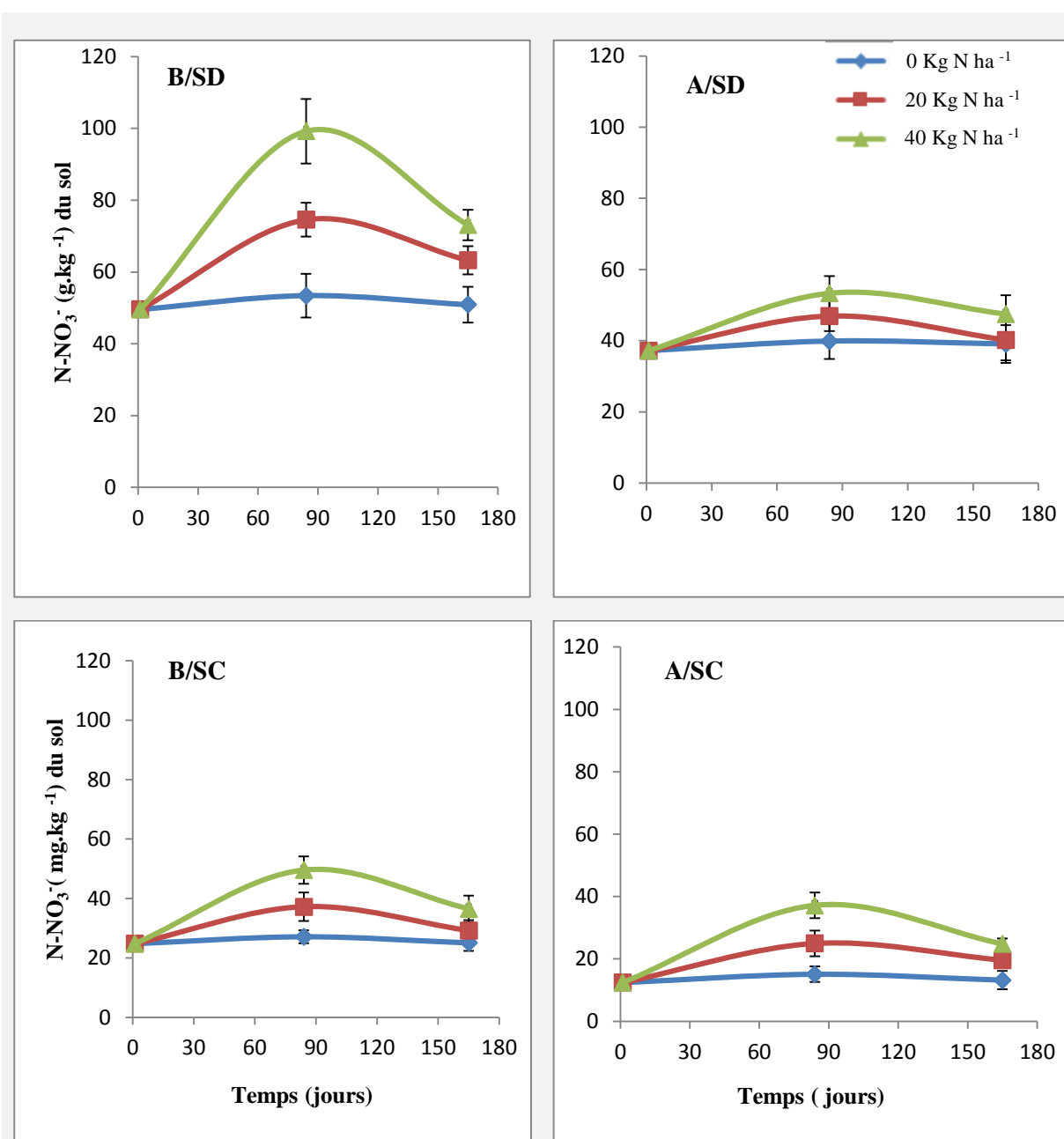


Figure 3 : Evolution de la teneur de l’azote nitrique du sol selon le mode du travail du sol, le précédent cultural et la fertilisation azotée

B : Blé dur ; A : Avoine; SC: semis conventionnel; SD: semis direct

3.4. L'azote ammoniacal du sol

A l'installation de l'essai l'azote ammoniacal ($N-NH_4$), était compris entre $9,2 \pm 0,78$ et $18,8 \pm 1,12$ $mg.kg^{-1}$, en effet la teneur du NH_4 du sol collecté après avoine conduit en semis conventionnel est égale à $9,2 mg.kg^{-1}$, pour le sol collecté après avoine conduit en semis direct la teneur du NH_4 est supérieure aux sols du semis conventionnels par 94,5 % le sol collecté après blé dur conduit en mode semis conventionnel contient $11,4 \pm 0,4 mg.kg^{-1}$, celui conduit en mode semis direct est supérieur par 64,9% par rapport au semis conventionnel (Tableau 1). La richesse des sols collecté après blé dur en azote par rapport à ceux collecté après avoine est peut être expliquée par la richesse des résidus de blé dur par l'azote par rapport à ceux de l'avoine (Singh et al. 2005). 84 jours après semis de fenugrec, pendant le stade 50% floraison, la teneur du sol en NH_4 était influencée significativement par le précédent cultural, le travail du sol et la fertilisation azotée, pendant la récolte, l'analyse statistique a montré que le précédent cultural, le travail du sol, leur interaction et la fertilisation azotée avaient un effet sur le NH_4 . (Tableau 2)

Pendant le stade 50% floraison, le sol collecté après blé dur contient $14,91 mg.kg^{-1}$ du NH_4 , alors pour le sol collecté après avoine contient $13,16 mg.kg^{-1}$ du NH_4 . Le sol conduit en mode semis direct contient $16,85 mg.kg^{-1}$ du NH_4 , le sol conduit en semis conventionnel contient $11,21 mg.kg^{-1}$ du NH_4 , les pots non fertilisés contiennent $12,5 mg.kg^{-1}$ du NH_4 , les pots fertilisés par l'équivalent de 20 kg par hectare contiennent $14,57 mg.kg^{-1}$ du NH_4 et ceux fertilisés par l'équivalent de 40 kg par hectare contiennent $15,38 mg.kg^{-1}$. Après la récolte on a observé une augmentation de la concentration de NH_4 pour tous les facteurs mais avec la même allure, (Tableau 3). Les résidus de culture avec un rapport C : N bas se décomposent rapidement et causent une petite immobilisation, ainsi une augmentation potentielle de la fourniture d'azote au sol durant les premiers stades du cycle de croissance (Willson et al. 2001).

Pour le sol collecté après blé dur et conduit en mode semis direct, la fertilisation azotée n'avait aucune influence sur la concentration de NH_4 pendant le stade 50% floraison ($P=0,0821$), ni pendant la récolte ($P=0,5832$).

Pour le sol collecté après blé dur conduit en mode semis conventionnel la fertilisation azotée avait un effet significatif sur la teneur du NH_4 pendant le stade 50% floraison, ($P=0,0047$), la valeur la plus élevée était observée dans les pots fertilisés par l'équivalent de 40 kg d'N ($13,05 mg.kg^{-1}$), les pots non fertilisés contiennent $10,39 mg.kg^{-1}$, les valeurs enregistrées dans les traitements 20 et 40 kg par hectare sont supérieures à celles enregistrées à l'installation de l'essai, alors que pour le traitement non fertilisation, elle est inférieure à la valeur initiale.

Les reliquats en NH_4 sont également influencés par la fertilisation azotée ($P=0,0024$), les pots non fertilisés et ceux fertilisés par l'équivalent de 20 kg d'azote par hectare contiennent des valeurs similaires, $12,07$ et $12,81 mg.kg^{-1}$ respectivement, les pots fertilisés par l'équivalent de 40 kg par hectare contiennent $14,42 mg.kg^{-1}$, les reliquats sont supérieurs aux valeurs enregistrées pendant le stade 50 % floraison et sont également supérieurs aux valeurs initiales.

Concernant le sol récolté après une culture d'avoine conduit en semis direct, la fertilisation a influencé la teneur du NH_4 seulement pendant la récolte ($P=0,0382$), en effet les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les pots fertilisés par l'équivalent de 20 et 40 kg d'N par hectare ($19,16$ et $19,23 mg.kg^{-1}$), les pots non fertilisés contiennent $17,95 mg.kg^{-1}$, les reliquats en NH_4 sont supérieurs aux valeurs initiales seulement pour les pots fertilisés.

Finalement pour le sol récolté après avoine et conduit en mode de semis conventionnel, le NH_4 a été influencé par la fertilisation azotée pendant le stade 50 % floraison ($P=0,0308$), en effet les doses 20 et 40 kg d'N par hectare ont permis de donner des teneurs similaires qui sont les plus élevées ($11,73$ et $11,66 mg.kg^{-1}$ respectivement) la teneur la moins élevée était observée pour les sols non fertilisés ($8,44 mg.kg^{-1}$). Pendant la récolte, les reliquats en NH_4 étaient influencés par la fertilisation azotée ($P=0,0083$) les doses d'azote de 20 et 40 kg par hectare ont donné les teneurs les plus élevées ($11,36$ et $11,88 mg.kg^{-1}$) les pots non fertilisés contiennent $10,26 mg.kg^{-1}$, ces valeurs sont similaires à celles enregistrées pendant la floraison à l'exception des pots non fertilisés qui ont accumulés des quantités pendant la récolte (Figure 4)

Les reliquats en NH_4 sont supérieurs aux teneurs initiales pour toutes les doses d'azote appliquées, les légumineuses augmentent de la fourniture en azote du sol, (Rosen 2007)

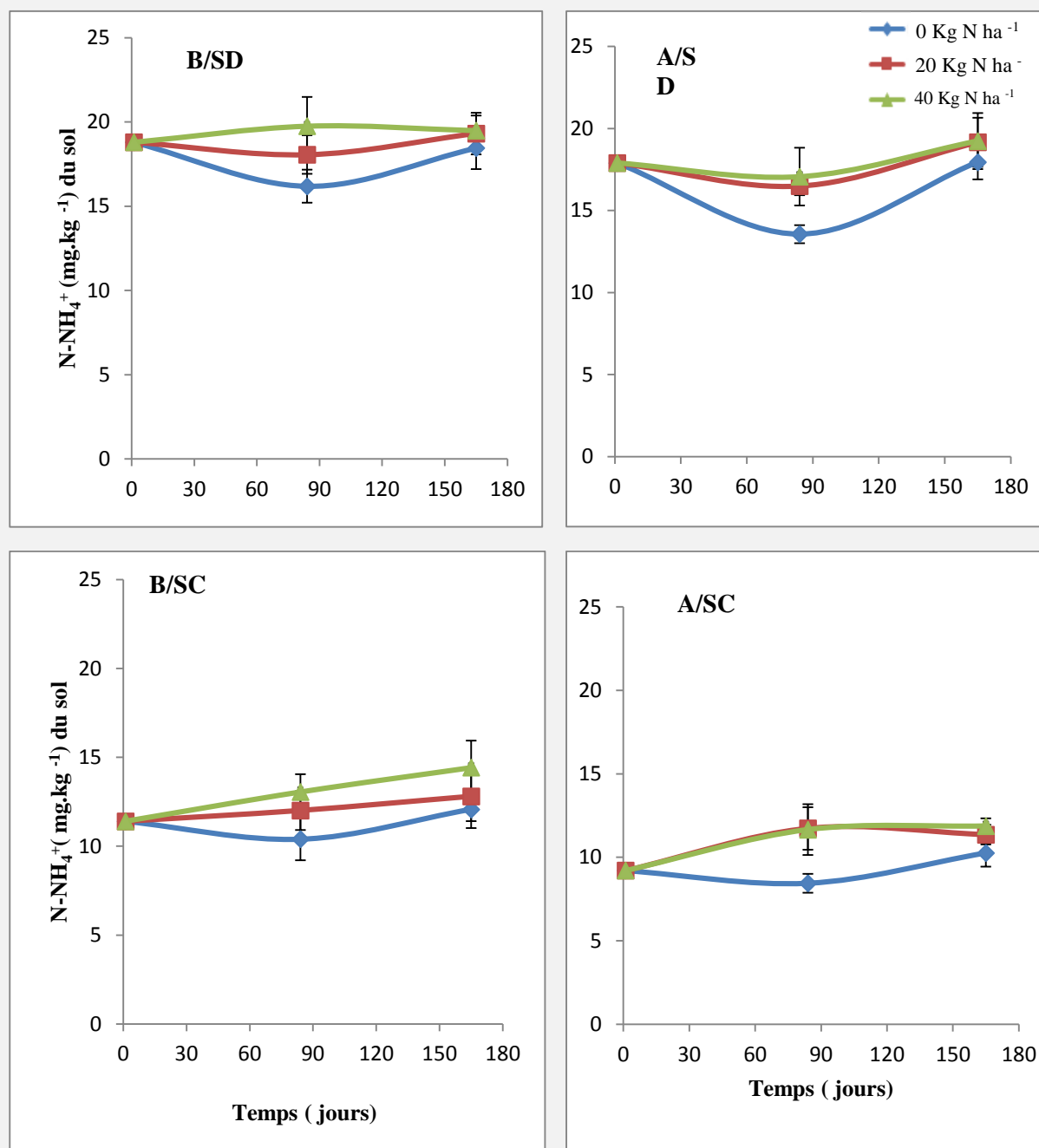


Figure 4 : L'évolution de la teneur de l'azote ammoniacal du sol selon le mode du travail du sol, le précédent cultural et la fertilisation azotée

B : Blé dur ; **A :** Avoine ; **SC :** semis conventionnel ; **SD :** semis direct

3.5. La conductivité électrique

La conductivité électrique (CE) au début de l'essai était comprise entre $1,18 \pm 0,087$ et $1,42 \pm 0,09$ ms/m (Tableau 1), La CE du sol collecté après avoine et conduit en semis conventionnel présente une valeur de 1,18 ms/m et la CE du sol collecté du mode semis direct est de 1,3 ms/m. Le sol collecté après blé dur et conduit en mode semis direct a une CE égale de 1,42 ms/m alors que celle du sol conduit en mode semis-conventionnel est de 1,29 ms/m. Après la récolte, on a observé que la CE est influencée par le précédent cultural, le travail du sol et la fertilisation azotée (Tableau 2). La CE du sol collecté après blé dur est égale à 1,32 ms/m, alors qu'elle est 1,24 ms/m pour le sol collecté après avoine. La CE du sol conduit en mode semis-direct a une valeur de 1,34 ms/m et celle du sol conduit en semis conventionnel est de 1,22 ms/m (tableau 3). Les pots fertilisés par l'équivalent de 40 kg d'azote par hectare ont enregistré la CE la plus élevée (1,3 ms/m), alors que les pots non fertilisés ont

enregistré les valeurs de CE les plus basses (1,25 ms/m). Hati et al (2006) ont observé une corrélation hautement significative ($r=0,69$) entre le COS et la CE et que la fertilisation azotée à des doses croissantes augmentent la CE, Armenise et al (2013) ont trouvé également que la fertilisation azotée influence significativement la CE, toutefois la culture et les résidus de cultures n'avaient aucun effet sur la CE.

Pendant la récolte les sols collectés après blé dur et conduits en mode semis-direct et en mode semis conventionnel n'étaient pas influencés par la fertilisation azotée, on a observé que la CE pendant la récolte est inférieure à la CE initiale. Les sols collectés après avoine et conduits en mode semis direct et semis conventionnel n'étaient pas également influencés par la fertilisation azotée. On a observé que la CE pendant la récolte est supérieure à la CE initiale à l'exception des pots non fertilisés (Figure 5).

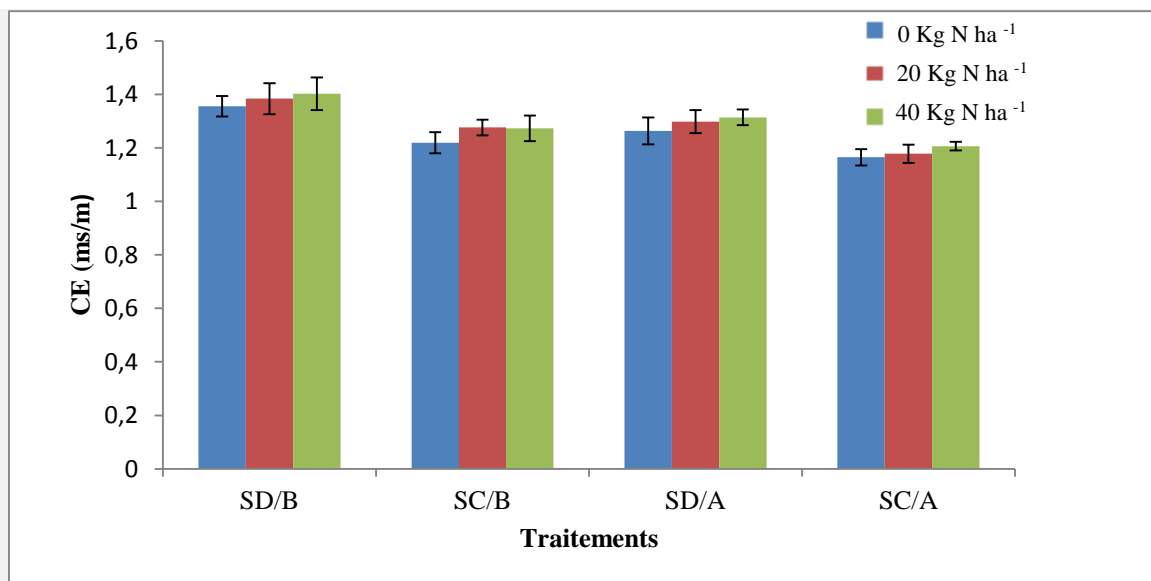


Figure 5 : Conductivité électrique selon le mode du travail du sol, le précédent cultural et la fertilisation azotée
B : Blé dur ; **A :** Avoine; **SC:** semis conventionnel; **SD:** semis direct

4. Conclusion

Après des années d'expérimentation, le système non labour a modifié les propriétés chimiques du sol à savoir le COS et l'azote sol. L'accumulation de la matière organique à la surface du sol sous semis direct a permis l'enrichissement des couches superficielles en azote et en carbone en comparaison avec le labour conventionnel. D'autre part, on constate que le blé dur comme précédent cultural améliore également les propriétés chimiques comparé à l'avoine. On constate également que la qualité de ce sol a été améliorée sous semis direct à des degrés variés selon les rotations pratiquées. L'évolution du COS et les reliquats au stade récolte sont influencés par le mode du travail du sol, le précédent cultural et la fertilisation azotée. La fourniture d'azote est influencée par les paramètres chimiques du sol et les reliquats en azote sont supérieurs aux teneurs initiales pour tous les traitements, car les légumineuses sont connues par la fixation biologique de l'azote. La conductivité électrolytique est influencée par le précédent cultural, le travail du sol et la fertilisation azotée.

5. Références

- Dispeper N, Baccou JC, Sauvaire Y (1985).** Influence de la teneur en nitrate sur l'évolution des activités nitrate réductase et nitrogénase du fenugrec (*Trigonella foenum-graecum* L.). *Agronomie*, EDP Sciences , 5 (6) :539-547
- Petropoulos, GA (2002)** Fenugreek (The genus *Trigonella*). 1st Edition, Taylor & Francis, London and New York, pp: 195,
- Larson WE, Pierce FJ (1991).** Conservation and enhancement of soil quality. In *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World...* Technical Papers. Bangkok, Thailand: International Board for soil research and management, IBSRAM. Proceedings N° 12.(2).

- Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DF, Steward B.A. (1994).** Defining soil quality for a sustainable environment. *SSSA Spec. Publ.* 35. ASA and SSSA, Madison, WI. USA.
- Campbell CA, R郑zntner (1993).** Soil Organic Matter as influenced by crop rotations and fertilizer. *Soil Sci. Soc. Am.* J57: 1034-1040.
- Unger PW, Fulton LJ (1990)** Conventional- and no-tillage effects on upper root zone soil conditions. *Soil Tillage Res* 2:379-393.
- Campbell CA, McConkey BG, Zentner R.P, SellesF, Curtin D (1996).** Long- term effects of tillage and crop rotations on soil organic matter and total N in a clay soil in southwestern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci*76 :395-401.
- Campbell CA, Janzen HH (1995)** Effect of tillage on soil organic matter. in *Farming for a better environment.* SWCS, Ankeny, IA, USA. 9-11
- Dharmakeerthi RS, Kay B D, BeauchampE G (2005).** Factors contributing to changes in plant available nitrogen across a variable landscape. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:453–462.
- Subbarao GV, Ito O, Sahrawat KL, Berry W L, NakaharaK., Ishikawa T, Watanabe T, Suenaga K, Rondon M, Rao IM(2006).** Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems— Challenges and opportunities. *Crit. Rev. Plant Sci.* 25:303–335.
- Pathak H, Rao D L N (1998)**Carbon and nitrogen mineralization from added organic matter in saline and alkali soils. *Soil Biol. Biochem.* 30:695–702.
- Testa VM, Teixeira, LAJ., Mielniczuk, J, (1992)** CaracterõAsticasquõÂmicas de um PodzoÂlicoVermelho-escuroafetadasporsistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo* 16:107-114.
- Teixeira LAJ, Testa VM, Mielniczuk J, (1994)**NitrogeÃnio no solo, nutricaoÃo e rendimento de milhoafetadosporsistemas de cultura. *R. Bras. Ci. Solo* 18 :207-214.
- Angers DA, BolinderM.A, Carter MR, Gregorich EG, Drury C.F, Liang BC, VoroneyRP, Simard RR, Donald RG, Beyaert, RP, Martel J (1997)**Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil Till. Res.* 41:191-201.
- Janzen HH, Campbell CA, Izaurralde RC., Ellert BH, Juma N, McGill WB, ZentnerRP (1998)**Management effects on soil C storage on the Canadian Prairies. *Soil Till. Res.* 47:181- 195.
- Alvarez R, Lavado RS (1998)**Climate, organic matter and clay content relationship in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83:127-141.
- Mueller T, Thorup-Kristensen K (2001)**N-fixation of selected green manure plants in an organic crop rotation. *Biol. Agric. Hort.* 18:345–363.
- Graham PH (2005)**Biological dinitrogen fixation: Symbiotic. In “Principles and Applications of Soil Microbiology” (D. M. Sylvia, J. J. Fuhrmann, P. G. Hartel, and D. A. Zuberer, Eds.),. 405–432. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Stark JC, Porter G A (2005)**Potato nutrient management in sustainable cropping systems. *Am. J. Potato Res.* 82:329–338.
- Thorup-Kristensen K, MagidJ, Jensen LS (2003)**Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Adv. Agron.* 79:227–302.
- Zebarth, BJ, Rosen CJ (2007)** Research perspective on nitrogen bmp development for potato. *Am. J. Potato Res.* 84: 3–18.
- Sharifi, M, Zebarth BJ, Porter G A, Burton DL, Grant, CA (2009)** Soil mineralizable nitrogen and soil nitrogen supply under two-year potato rotations. *Plant Soil* 320: 267–279.
- Willson TC, Paul EA, Harwood RR (2001)**Biologically active soil organic matter fractions in sustainable cropping systems. *Appl. Soil Ecol.* 16: 63–76.
- Sanchez JE, Harwood RR, WillsonT C, Kizilkaya K, Smeenk J, Parker E, Paul E A, Knezek B D, Robertson G P (2004)** Managing soil carbon and nitrogen for productivity and environmental quality. *Agron. J.* 96: 769–775.
- Chantigny M H, Angers D A, Morvan T, Pomar C (2004)** Dynamics of pig slurry nitrogen in soil and plant as determined with ¹⁵N. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:637–643.
- Tan CS, Drury CF, Reynolds W D, Groenevelt P H, Dadfar H (2002)** Water and nitrate loss through tiles under a clay loam soil in Ontario after 42 years of consistent fertilization and crop rotation. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93: 121–130.
- Mkhabela MS, Madani A, Gordon R, Burton D, Cudmore D, Elmi A, Hart W (2008)** Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure. *Soil Tillage Res.* 98: 187–199.
- Drury C F, Findlay W I, Gaynor J D, McKenney D. J (1993)** Influence of tillage on nitrate loss in surface runoff and tile drainage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 797–802.
- Fuller K D, Gordon R, Grimmett M, Fillmore S, Madani A, VanRoestel J, Stratton G. W, MacLeod J, Embree C, George ES, (2010)**Seasonal and crop rotational effects of manure management on nitrate-nitrogen leaching in Nova Scotia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 137: 267–275.

- Stoddard C S, Grove J H, Coyne M S, Thom WO (2005)** Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching. *J. Environ. Qual.* 34: 1354–1362.
- Jadwiga W, Krystyna ŻG, (2014)** The impact of nitrogen fertilization and Rhizobium inoculation on the yield and quality of *Trigonella foenumgraecum* L. *J. Elem. S.* 1109–1118
- Feller, (1995)** La matière organique du sol: un indicateur de la fertilité, Application aux zones Sahélienne et Soudanienne, *Agriculture et développement* 7 no 8 - Décembre,
- Recous S (2001)** Du labour au semis direct : enjeux agronomique, Dossier réalisé à l'occasion d'une conférence-débat organisée par l'INRA en collaboration avec l'ITCF
- SAS Institute. (2001)** SAS/STAT Software. Release 8.2. SAS Institute, Cary, NC.
- Bouyoucos G. J (1962)** Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agronomy Journal* 53: 464–465.
- Jones Jr, J. B (1991)** Kjeldahl Method for Nitrogen Determination. Athens, GA: Micro-Macro Publishing.
- Bray R H, Kurtz LT (1945)** Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59: 39–45.
- Schollenberger C J, Simon RH (1945)** Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil-ammonium acetate method. *Soil Science* 59: 13–24.
- Rouiller J (1986)** Techniques de laboratoire. Centre de Pédologie Biologique. Centre national de la recherche scientifique. Hermann. France.
- Nelson DW, Sommers LE, (1982)** Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Second ed.* Agron. Monographs 9, Am. Soc. Agron. SoilSci. Soc. Am., Madison, WI : 539–579.
- Saber N , Mrabet R (2002)** Influence du travail du sol et des rotations de cultures sur la qualité d'un sol argileux gonflant en milieu semi-aride marocain. *Étude et Gestion des Sols, Volume 9* :43 – 53
- St. Luce M, Whalen J K , Ziadi N , Zebarth B J (2011)** Nitrogen Dynamics and Indices to Predict Soil Nitrogen Supply in Humid Temperate Soils. *Advances in Agronomy*, 112: 55 – 102
- Mrabet R, Ibno Namr K, Bessam F, Saber, N., (2001).** Soil chemical quality changes organic matter and structural stability of a Calcixeroll soil under different wheat rotations and tillage systems in a semiarid area of Morocco. *Land Degradation and Development* 12: 505–517
- Yadvinder S, Bijay S, Timsina J (2005)** Crop residue management for nutrient cycling and improving soil productivity in rice-based cropping systems in the tropics. *Advances in Agronomy* 85: 269-407
- Hati K M, Swarup A , Dwivedi AK , Misra AK, Bandyopadhyaya KK (2007)** Changes in soil physical properties and organic carbon status at the topsoil horizon of a vertisol of central India after 28 years of continuous cropping, fertilization and manuring. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 119: 127–134
- Armenise E , Redmile-Gordon MA , Stellacci AM , Ciccamesse A , Rubino P (2013)** Developing a soil quality index to compare soil fitness for agricultural use under different managements in the Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 130: 91–98