

DEVENIR DE L'AZOTE DE L'ENGRAIS ENRICHI AU ¹⁵N APPLIQUÉ AU TOURNESOL ET RÉCUPÉRATION DE L'AZOTE RÉSIDUEL PAR TROIS CULTURES SUBSÉQUENTES SOUS DEUX MODES DE GESTION DES RÉSIDUS DE RÉCOLTE DE TOURNESOL

NABILA EL ALAMI et MOHAMED ISMAILI¹

Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Département des Sciences de la Vie, BP 523,
CP 23000. Béni-Mellal, Maroc

¹Faculté des Sciences, Université Moulay-Ismaïl, BP 4010, CP 50000,
Béni M'hamed, Meknès Maroc

(Received 2 January, 2005; accepted 5 May, 2005)

RÉSUMÉ

L'utilisation de l'azote du (NH₄)₂SO₄ enrichi en ¹⁵N et sa distribution dans le sol ont été étudiées dans une succession tournesol – blé – tournesol – blé, avec ou sans enfouissement des résidus de tournesol. L'utilisation de l'azote de l'engrais par la culture de tournesol a été appréciée par la détermination du coefficient d'utilisation apparent (CUA) estimé par la méthode de différence et du coefficient d'utilisation réel (CUR) estimé par la méthode isotopique. 80 kg N ha⁻¹ à 4.87 % d'atomes en excès de ¹⁵N ont été appliqués au tournesol de la première année. CUR de la culture du tournesol a été en moyenne 24.4 % de l'azote appliqué, 50.5 % de l'azote appliqué sont restés dans le sol (à 0.9 m de profondeur) et 25.1 % n'ont pas pu être récupérés. Aucune différence significative (P = 0.05) n'a été notée entre les valeurs de CUR et celles de CUA (22.7 % de moyenne). De même l'apport de N de l'engrais n'a pas stimulé l'utilisation de l'azote du sol par la plante. Ce qui indique que ANI (interaction de l'azote ajouté) n'avait pas un effet majeur sous les conditions de notre expérimentation. De l'azote résiduel dans le sol à la récolte du tournesol moins de 8 % ont été mobilisés par l'ensemble des trois cultures suivantes : (1.7-2 %) de l'apport initial pour la seconde culture, (3.5-3.7 %) pour la troisième culture et (1.5-2.1 %) pour la quatrième culture. L'enfouissement des résidus de tournesol n'a pas eu d'effet significatif sur les taux de récupération de l'azote de l'engrais résiduel par les trois cultures. Il a cependant permis de laisser davantage de résidus dans le sol jusqu'à 90 cm de profondeur (35.5 % au lieu de 27.2 % en sol sans enfouissement des résidus) et de diminuer de 32.8 kg ha⁻¹ à seulement 26.4 kg ha⁻¹ l'azote de l'engrais perdu du système plante – sol à la récolte de la quatrième culture. D'un autre côté, l'enfouissement des résidus de récolte de la première culture de tournesol n'a pas eu d'effet significatif (P = 0.05) sur le rendement en grains et l'alimentation azotée de la deuxième et la troisième culture. Après un deuxième enfouissement des résidus du tournesol de la troisième saison, le rendement en grain du blé suivant fut nettement amélioré suggérant l'effet à plus ou moins long terme de cette pratique.

Mots Clés: Azote résiduel, résidus de tournesol, rotation tournesol, blé

ABSTRACT

A field experiment was conducted on a vertisol in semi-arid Morocco to assess the fate of ¹⁵N labelled ammonium fertiliser applied to sunflower – wheat – sunflower – wheat cropping sequence with the labelled N applied to the first crop. The effect of sunflower residues incorporation on the recovery of residual N labelled fertiliser by subsequent crops was also investigated. Application of 80 kg N ha⁻¹ labelled with 4.87 % ¹⁵N atom excess (a. e.) was made to sunflower which recovered 24.4 % N while 50.5 % remaining in the top 90 cm of the soil at harvesting time, which 68 % was in the upper 30 cm. 25.1 % of the applied ¹⁵N could not be accounted for, and was assumed

to be lost from the soil-plant ecosystem primarily through denitrification and volatilisation. The total plant recovery of ^{15}N -labelled fertilizer as determined by the isotopic and the difference method was in the same range, with a mean of 23.3 %. No priming effect of added fertilizer N (ANI) on the mineralization of soil N was observed. Of the residual ^{15}N -labelled fertilizer, The three successive crops (wheat, sunflower and wheat) recovered respectively 1.4, 2.9 and 1.2 kg N. ha⁻¹ in T1 treatment plots (with sunflower residues incorporation) and 1.6, 2.8 and 1.6 kg N. ha⁻¹ in T2 treatment plots (without sunflower residues incorporation). The three crops recovered together only 6.9 and 7.6 % of N-labelled fertilizer initially applied to the first crop of sunflower in T1 and T2 respectively. Incorporation to soil of sunflower residues has not a significant effect in the crops recovery of the residual ^{15}N labelled fertilizer. But it showed a significant increase of ^{15}N in soil, and a decrease in the total losses of nitrogen from plant-soil ecosystem by about 20 %. Addition of residues had not a significant effect on total N content and dry matter yields of the second and third crops but has lead to increase of in fourth crop grain yield.

Key Words: Nitrogen utilisation efficiency, residual N, sunflower , wheat rotation, sunflower residues

INTRODUCTION

L'apport d'engrais azotés chimiques a largement contribué à l'amélioration et au développement de la productivité des cultures partout dans le monde. Toutefois, les engrais chimiques peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement si leur utilisation n'est pas optimisée (FAO, 2002). Le raisonnement de la fertilisation azotée s'impose donc vivement. Dans ce contexte, l'évaluation de l'efficacité d'utilisation de l'engrais azoté par les cultures s'avère d'une grande importance.

Les concepts de Coefficient Apparent d'Utilisation (CAU) ou de Coefficient Réel d'Utilisation de l'azote (CRU) ont été développés dans ce but (Tran *et al.*, 1996). Le CAU est estimé par la technique dite de différence qui consiste à soustraire le prélèvement total en azote du témoin (non fertilisé) de celui du traitement fertilisé et à diviser par la quantité de N de l'engrais ajoutée. Il est dit apparent car il ne prend pas en compte l'influence de l'azote provenant du sol. Le CRU est une évaluation plus réelle des quantités d'azote prélevées par la plante et provenant de l'engrais. Il est mesuré en utilisant la technique de marquage isotopique de l'engrais azoté avec ^{15}N . Cette technique permet aux chercheurs de suivre aisément les mouvements de N de l'engrais dans le système plante – sol et de déterminer, directement et avec précision, les contributions relatives de N de l'engrais et de N du sol dans le prélèvement total en azote de la culture (Tran *et al.*, 1996).

Des erreurs sont cependant associées à chacune de ces deux techniques : la technique de différence est associée à l'hypothèse que toutes les

transformations de N dans le sol (minéralisation, immobilisation et autres) sont semblables pour le témoin non fertilisé et le traitement fertilisé, ce qui est un peu erroné. L'apport de fertilisant stimule les transformations de N du sol (Rao *et al.*, 1991). Il peut en résulter une augmentation de la disponibilité de l'azote dans le sol qui aboutit parfois à une surestimation du CAU. Ce phénomène a été désigné sous le nom de ANI (Interaction de N Ajouté) (Jenkinson *et al.*, 1985). La technique isotopique présente aussi des inconvénients : Outre le prix élevé du matériel utilisé et qui a souvent limité l'utilisation de cette technique à des essais en pots ou sous serre, rarement au champs, l'interprétation des résultats est souvent compliquée (Schindler et Knighton, 1999) par le phénomène de substitution des pools de N dans le sol principalement à travers le cycle interne de l'azote du sol (qui est constitué par les deux processus opposés de minéralisation et d'organisation) (Recous *et al.*, 1997). L'organisation, par les microorganismes du sol, de ^{15}N introduit par l'engrais enrichi aboutit à la diminution de la disponibilité de cette forme d'azote aux cultures en faveur de la forme ^{14}N du sol, ce qui peut engendrer une sous-estimation des valeurs de CRU. Ce phénomène est également désigné sous le nom de ANI (Jenkinson *et al.*, 1985). La distinction peut être faite entre les deux types de ANI susmentionnés. Le premier est désigné sous le nom de ANI réel. Le second est qualifié de ANI apparent. Les phénomènes de ANI, réel ou apparent, ont été souvent observés par les chercheurs sous différents systèmes de cultures (MacDonald *et al.*, 1997 ; Eagle *et al.*, 2001; Ashraf *et al.*, 2004; Mohammad, 2004).

Le tournesol (*Helianthus annuus* L.) est la principale culture oléagineuse au Maroc (95 % de la production Marocaine sur la période 1992 – 1996) (INRA – CETIO – ASPOT, 1998). Les deux principales régions de production de cette culture au Maroc sont le Gharb (65 %) et le Saïs (14 %) (El Asri, 2001). Dans ces deux régions, le tournesol est pratiqué principalement en rotation biennale (tournesol – blé).

Il y a eu peu de travaux sur la fertilisation du tournesol au Maroc (Badraoui, 2001). Les travaux qui se sont intéressés à l'étude de l'efficacité d'utilisation de l'azote par le tournesol et sur l'effet de l'azote de l'engrais sur les composantes du rendement de cette culture sont aussi très rares. Aucune donnée n'est disponible concernant l'existence ou pas de ANI pour ce système de culture sous climat méditerranéen. Il y a aussi un manque frappant d'information sur le devenir de l'azote de l'engrais appliqué au tournesol que ce soit à court terme à l'échelle du cycle végétal qu'à long terme (au-delà de l'année de son application) dans la rotation tournesol – blé. Notons en fin que dans les quelques études réalisées dans ce domaine, les techniques isotopiques sont très rarement utilisées, certainement du fait du coût et de la lourdeur de ces procédures.

La présente étude a été conduite dans le but de : (i) déterminer la réponse du tournesol à la fertilisation azotée appliquée à la dose de 80 kg N ha⁻¹ (ii) examiner les estimations de l'utilisation de N de l'engrais par les deux techniques (isotopique et de différence) et en déduire l'existence ou non de l'effet ANI pour le système de production du tournesol en climat méditerranéen sous les conditions de l'essai. (iii) estimer les quantités de N de l'engrais résiduel dans le sol à la récolte de la première culture de tournesol et déterminer la contribution de cet azote résiduel dans l'alimentation azotée de trois cultures subséquentes : Le blé (*Triticum aestivum* L. var. *Merchouch*), le tournesol (*Helianthus annuus* L. var. *Viki*) puis le blé (*Triticum aestivum* L. var. *Merchouch*). (iv) étudier l'effet de l'enfouissement dans le sol des résidus de récolte du tournesol sur les rendements en matière sèche, l'alimentation azotée et le recouvrement en azote de l'engrais résiduel dans les cultures subséquentes. (v) déterminer le bilan de ^{15}N de

l'engrais à la récolte la première culture du tournesol et après quatre cycles végétales.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Situation géographique et conditions pédoclimatiques du site de l'essai. L'étude est réalisée à la Ferme d'Application de l'Ecole Nationale de l'Agriculture de Meknès, Maroc, qui est localisée sur le plateau du Saïs à 625 m d'altitude, 5°33' de longitude et 33°53' de latitude. La région est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride à hiver tempéré (Sauvage, 1963).

Le sol est de type iso humique calci-magnésique carbonaté, brun calcaire, de texture argilo limoneuse moyennement profond (80 – 100 cm). Des analyses granulométriques et physico-chimiques du sol ont été réalisées sur des échantillons prélevés à trois profondeurs : 0 – 30 cm, 30 – 60 cm et 60 – 90 cm. Les résultats de ces analyses sont présentés sur le Tableau 1.

L'essai a été mené au cours de trois campagnes agricoles : 1996/1997, 1997/1998 et 1998/1999 avec la production de deux cultures par campagne. Durant la première et la deuxième campagne, la pluviométrie annuelle était moyenne (541 et 558 mm respectivement pour les campagnes 1996/1997 et 1997/1998) mais mal répartie (Fig. 1). La troisième campagne (1998/1999) était plutôt sèche avec une pluviométrie annuelle de 281 mm. Durant toute la période de l'essai, la température mensuelle minimale n'a jamais descendu en dessous de zéro et a varié de 4.2 °C en janvier 1998 à 20.1 en septembre 1997 (Fig. 1). De même, la température mensuelle maximale n'a jamais excédé 35 °C et a varié de 14.9 °C en janvier 1998 à 34.3 °C en Août 1998 (Fig. 1).

Dispositif expérimental. Le sol de l'essai a subi au préalable un travail profond, puis, une fertilisation uniforme de 85 kg. K₂O ha⁻¹ (superphosphate triple) et 126 kg. P₂O₅ ha⁻¹ lui a été appliquée à la volée. Elle est suivie de deux passages de cover-crops, puis seize parcelles élémentaires de 16 m² chacune ont été délimitées. Le sulfate d'ammonium ($^{15}\text{NH}_4$)₂ SO₄ marqué au ^{15}N est appliqué en bande à la dose totale de 80 kg. N ha⁻¹, fractionné en deux apports (50 % au semis - 50 % au stade deux à quatre feuilles). Le

TABLEAU 1. Caractéristiques physico-chimiques du sol du site d'expérimentation

Profondeur (cm)	Caractéristiques chimiques					Texture pourcentage de terre fine				
	pH _s (H ₂ O)	CaCO ₃ \$\$ (%)	M.O\$\$\$ (%)	NO ₃ mg kg ⁻¹	P et K assimilables P ₂ O ₅ g kg ⁻¹ K ₂ O	Argile <2μ	Limon 2-20μ	Sable fin 20-50μ	Sable moy. 50-200μ	Sable grossi 200-2000μ
0-30	8,44	26	3,12	9,34	9,0	31,9	52	6,8	7,2	2,1
30-60	8,33	26,8	2,84	26,15	9,8	30,9	53,5	6,3	7,1	2,2
60-90	8,23	27,6	2,98	49,03	10,3	33,3	48,6	7,6	8,1	2,4

§: pH (H₂O) mesuré dans l'eau avec un rapport sol / solution de 1: 1 et un temps d'équilibre d'une heure

\$\$: calcaire total

\$\$\$: matière organique

pourcentage d'enrichissement en atomes de ¹⁵N dans (¹⁵NH₄)₂ SO₄ était de 4,87 %. L'essai est composé de deux parties. La première consiste à appliquer au tournesol 80 kg N ha⁻¹ et d'étudier le devenir à court terme (à l'échelle du cycle végétal) de cet azote. La seconde consiste à suivre le devenir de l'azote de l'engrais résiduel durant trois cycles végétales, sous deux modes de gestion des résidus de récolte du tournesol (enfouis dans le sol ou éliminés).

Le dispositif expérimental consiste en quatre traitements distribués de façon aléatoire dans chaque bloc et répétés quatre fois:

- 1- Un traitement (T1) qui reçoit 80 kg. N ha⁻¹ sous forme de (¹⁵NH₄)₂ SO₄ enrichi de ¹⁵N avec enfouissement au sol des résidus du tournesol à la récolte.
- 2- Un traitement (T2) qui reçoit 80 kg. N ha⁻¹ sous forme de (¹⁵NH₄)₂ SO₄ enrichi de ¹⁵N avec élimination des résidus du tournesol à la récolte.
- 3- Un traitement (T3) qui reçoit 80 kg. N ha⁻¹ sous forme de (NH₄)₂ SO₄ normale.
- 4- Un témoin (T0) sans aucun apport d'azote.

Toutes les parcelles ont été semées par le tournesol (*Helianthus annuus* L. var. Viki) en février 1997 à la dose 75 000 pieds ha⁻¹. Trois irrigations de 60 mm chacune ont été pratiquées durant le cycle végétal de la culture. A la récolte du tournesol qui a lieu en juillet 1997, les CRU et CAU sont déterminés et le bilan de ¹⁵N est établi. Pour la suite de l'essai, seules les parcelles des traitements T1 et T2, ayant reçu l'engrais enrichi en ¹⁵N, sont utilisées. Les résidus de récolte du tournesol produits sur ces parcelles sont ramassés soigneusement et emportés hors des parcelles. Ils sont utilisés dans des essais concomitants. Les résidus non marqués en ¹⁵N produits sur les parcelles du traitement T3 sont enfouis dans le sol des parcelles du traitement T1. ces résidus constitués de tige, feuille et capitules vides, sont d'abord pesés, puis découpés manuellement en petits fragments de 2 à 7 cm de long avant d'être enfouis dans le sol, en lits de 15 à 20 cm de

profondeur. Les parcelles du traitement T2 sont laissées sans résidus.

Sur les parcelles des traitements T1 et T2, trois cultures ont été installées en succession : Le blé semé en août 1997 et récolté en décembre 1997, le tournesol semé en février 1998 et récolté en juillet 1998 puis le blé semé en août 1998 et récolté en décembre 1998.

Méthodes analytiques. A la récolte de chaque culture, les échantillons du matériel végétal aérien sont séparés en grains et résidus aériens (paille pour le blé, et tiges + feuilles + capitules vides pour le tournesol). Ils sont séchés à l'étuve à 70 °C jusqu'à poids stable, pesés, broyés puis tamisés à 0.5 mm. Les racines adventives à 20 cm de profondeur sont arrachées, les échantillons sont lavés à l'eau du robinet avant d'être séchés, broyés et tamisés à 0.5 mm. Les échantillons sont broyés dans l'ordre du moins concentré en ^{15}N , au plus concentré pour éviter les problèmes de contamination entre les échantillons.

Les échantillons du sol sont prélevés à des profondeurs de 0 – 30 cm, 30 – 60 cm et 60 – 90

cm. Pour chaque parcelle quatre prélèvements sont réalisés. Ils sont séchés, broyés et tamisés à 0.5 mm. Tous les échantillons (du matériel végétal et du sol) sont envoyés au laboratoire d'analyse de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique de Seibersdorf (Vienne) pour l'analyse de l'azote total (NT) et de l'abondance en ^{15}N . L'azote total des échantillons de matériel végétal et du sol a été déterminé par la méthode de digestion de Kjeldahl (Bremner, 1965). L'abondance en ^{15}N du matériel végétal a été déterminée par spectrométrie de masse de SIRA 9 (ANA SIRA) (Axman, 1990) après l'oxydation à l'hypobromide de Na (Axman et al., 1990)

Calculs et analyses statistiques. La proportion de l'azote de l'engrais marqué au ^{15}N absorbée sur le prélèvement total de N des cultures (% Ndff) a été calculée à partir du rapport de l'excès isotopique en ^{15}N (% ^{15}N a.e.) des échantillons du matériel végétal sur celui de l'engrais appliqué selon l'équation (1) (Zapata, 1990)

La proportion de N du sol dérivé par les cultures sur leur prélèvement total en azote (% Ndfs) est calculé par différence selon l'équation (2).

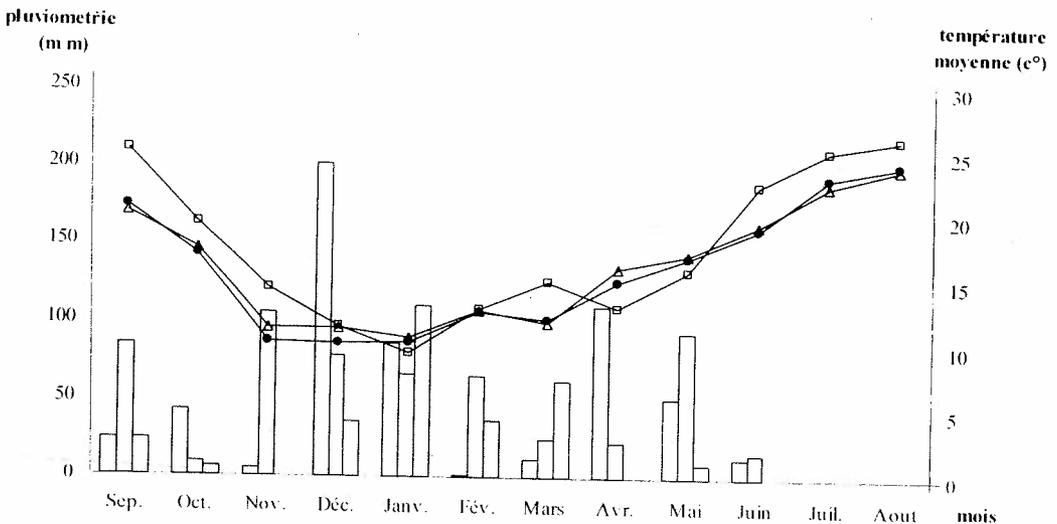


Figure 1. Distribution de la pluviométrie mensuelle et variation de la température moyenne mensuelle durant la période de l'essai (source: station E.N.A., Meknès).

$$\% \text{ Ndff} = \frac{\%^{15}\text{N a.e. dans la plante recevant l'engrais enrichi}}{\%^{15}\text{N a.e. dans l'engrais marqué appliqué}} * 100 \quad (1)$$

$$\% \text{ Ndfs} = 100 - \% \text{ Ndff} \quad (2)$$

CUR est déterminé, selon la technique isotopique, en multipliant le prélèvement total en N de la plante par % Ndff et divisant par la dose de N de l'engrais appliquée.

CUA est déterminé en soustrayant le prélèvement total en N du témoin non fertilisé de celui du traitement fertilisé et divisant par la quantité de N de l'engrais appliquée.

Le pourcentage de récupération du sol en ^{15}N de l'engrais (% Recsol) est calculé selon l'équation (3).

$$\% \text{ Recsol} = \frac{\text{N total du sol} * \%^{15}\text{N a.e. du sol}}{\text{N de l'engrais appliqué} * \%^{15}\text{N a.e. de l'engrais}} * 100 \quad (3)$$

% ^{15}N a.e. ou excès isotopique est calculé comme suit :

% ^{15}N a.e. de plante ou sol = (% ^{15}N a.e. de plante ou du sol dans les parcelles fertilisées) - (% ^{15}N a.e. de plante ou du sol dans les parcelles témoins) et

% ^{15}N a.e. de l'engrais = (% ^{15}N en abondance dans l'engrais) - (l'abondance naturelle en ^{15}N (0.3636 %)).

Toutes les données recueillies ont été statistiquement analysées par le logiciel SPSS. Pour la comparaison des moyennes le test ANOVA a été utilisé avec un seuil de probabilité de 5 %.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Première partie. Devenir de l'azote de l'engrais enrichi en ^{15}N appliqué au tournesol (utilisations et pertes).

Effet de la fertilisation sur les rendements en matière sèche et le prélèvement de N par la culture du tournesol

Les rendements en matière sèche totale (MST) étaient de 107.8 q ha⁻¹ de moyenne dans les parcelles témoins non fertilisées et ont significativement (P = 0.05) augmenté pour atteindre 123.1 q ha⁻¹ de moyenne dans les parcelles fertilisées (126.6, 122.7 et 120.1 q ha⁻¹) respectivement dans les parcelles des traitements T1, T2 et T3 (Tableau II).

L'apport de 80 kg N ha⁻¹ a produit en moyenne 13 % (moyenne des traitements T1, T2 et T3) de plus de rendement en MS des résidus que le témoin sans apport de N (Tableau 2). Il a aussi provoqué une augmentation significative (P =

TABLEAU 2. Effet de la fertilisation azotée sur les rendements en MS de la culture de tournesol

Traitement	Rendement en matière sèche (q ha ⁻¹)				
	Résidus	Racines	Graines	Total	
80 kg N ha ⁻¹ (¹⁵ N-engrais)	(T1)	87,94a [§] (1,3) ^{§§}	12,31a (0,4)	26,36a (1,5)	126,61a (2,0)
	(T2)	83,87a (6,7)	11,7a (0,7)	27,13a (1,2)	122,71a (7,1)
80 kg N ha ⁻¹ (¹⁴ N-engrais)	(T3)	82,32a (3,6)	11,97a (0,1)	25,77a (1,1)	120,06a (4,6)
Témoin non fertilisé	(T0)	73,70b (2,2)	9,83b (0,3)	24,30a (1,0)	107,82b (2,6)

§: dans la même colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement (P = 0,05) différentes

§§: les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

(¹⁵N-engrais) = engrais enrichi en ^{15}N

(¹⁴N-engrais): engrais non enrichi en ^{15}N

(14N-engrais): engrais non enrichi en ^{15}N

TABLEAU 3. Prélèvement en azote total par la culture de tournesol

Traitement	Prélèvement en azote total							
	Résidus		Racines		Graines		Total	
	(kg ha ⁻¹)	% \$\$\$	(kg ha ⁻¹)	%	(kg ha ⁻¹)	%	(kg ha ⁻¹)	
80 kg ha ⁻¹ (¹⁵ N-engrais)	(T ₁) 69,55 a§ (3,1)\$\$\$	51,8	5,51 (0,8)	4,1	59,05 (1,4)	44,0	134,11 (3,6)	
	(T ₂) 72,14 a (a) (5,4)	53,2	6,06 a (b) (1,6)	4,4	57,47 a (a) (3,1)	42,4	135,67 a (8,4)	
80 kg ha ⁻¹ (¹⁴ N-engrais)	(T ₃) 70,31 a (a) (4,2)	51,5	6,14 a (b) (0,4)	4,5 (1,5)	60,01 a (a)	44,0 (4,4)	136,46 a	
Termin non fertilisé	(T ₀) 61,92 b (a) (6,3)	53,0	4,99 a (b) (0,4)	4,28	49,79 b (a) (2,6)	42,7	116,70 b (5,5)	

§: dans la même colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement (P = 0,05) différentes

\$\$: dans la même ligne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement (P = 0,05) différentes

\$\$\$: les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

\$\$\$\$: distribution de l'azote absorbé dans les différentes parties de la plante

(¹⁵N-engrais) = engrais enrichi en ¹⁵N

(¹⁴N-engrais): engrais non enrichi en ¹⁵N

0.05) du rendement en MS des racines de 18.1 % de moyenne par rapport au témoin non fertilisé (Tableau 2).

L'apport de 80 kg N ha⁻¹ n'a cependant pas eu d'effet significatif (P = 0.05) sur le rendement grain: les rendements grains produits sur les parcelles fertilisées (traitements T1, T2 et T3) étaient de 26.4 q ha⁻¹ de moyenne. Sur les parcelles témoins (non fertilisées), les rendements grains ont atteint 24.3 q ha⁻¹ de moyenne (Tableau 2). Aucune différence significative n'a été notée entre les valeurs estimées sur les parcelles des traitements T1 et T2, fertilisées par l'engrais marqué au traceur et celles sur les parcelles du traitement T3, fertilisées par l'engrais ordinaire (Tableau 2).

On a souvent rapporté en littérature que la réponse du tournesol à la fertilisation azotée reste faible et ceci quelles que soient les conditions de culture et le stade des apports (CETIOM, 1995; Merrien, 1992 et INRA-CETIO-ASPOT, 1998). Dans une étude récente réalisée au Maroc (région du Gharb), sur la fertilisation du tournesol, cette dernière n'a eu d'effet positif sur le rendement en grains que sur sept essais, parmi treize réalisés (Badraoui *et al.*, 2001). Dans une expérience au champ réalisée par Scheiner *et al.* (2002) sur deux sites différents, la fertilisation azotée avait un effet non significatif sur le rendement en grain du tournesol sur un des deux sites. Sur l'autre par contre une amélioration significative du rendement en grains de 17 % a été notée sur les parcelles

fertilisées par rapport aux parcelles du témoin non fertilisé.

Les rendements en grains obtenus dans notre étude sont supérieurs au niveau moyen de la production nationale au Maroc qui est de 6.2 q ha⁻¹ (Aboudrare, 2000). Mais concordent avec ceux rapportés par différents chercheurs (Dimanche, 1997 et Scheiner *et al.*, 2002).

Le prélèvement de N par la plante entière du tournesol dans les parcelles du témoin non fertilisé était de 116.7 kg N ha⁻¹ de moyenne. Avec l'apport de 80 kg. N ha⁻¹, ce prélèvement a augmenté significativement (P = 0.05) à 134.1, 135.7 et 136.5 kg N ha⁻¹ respectivement dans les parcelles des traitements T1, T2 et T3 (Tableau 3). Aucune différence significative n'a été notée entre les résultats obtenus sur les parcelles fertilisées par l'engrais enrichi en ¹⁵N et celles fertilisées par l'engrais ordinaire (Tableau 3).

La fertilisation du tournesol à la dose 80 kg N ha⁻¹ avait un effet significatif (P = 0.05) sur le prélèvement de N par chacune des différentes parties de la plante (racines, graines et résidus aériens) (Tableau 3). La distribution de l'azote absorbée dans les différentes parties de la plante du tournesol était semblable dans les parcelles des traitements fertilisés (T1, T2 et T3) et les parcelles du témoin non fertilisé, avec en moyenne 43.3 % dans les graines, 52.4 % dans les parties aériennes et seulement 4.3 % dans les racines (Tableau 3). Des distributions semblables ont été rapportés par Merrien, (1992) et Corbeels (1997).

TABLEAU 4. Sources d'azote pour le tournesol (1^{ère} culture)

Traitement	Partie de la plante	Sources d'azote			
		Engrais		Sol	
		Ndff (kg ha ⁻¹)	% Ndff	Ndfs (kg ha ⁻¹)	% Ndfs
(T ₁) 80 kg ha ⁻¹ (¹⁵ N-engrais)	Résidus	9,59 (1,9) [§] _a ^{§§}	13,84 (3,0) _a	59,96 (3,6) _a	86,16 (2,6) _a
	Racines	0,76 (0,3) _b	13,69 (3,4) _a	4,75 (0,5) _b	86,31 (3,0) _a
	Graines	9,38 (2,5) _a	15,93 (4,4) _a	49,67 (3,0) _a	84,07 (3,8) _a
	Total	19,73 (3,1)	14,77 (2,7)	114,37 (5,8)	85,23 (2,4)
(T ₂) 80 kg ha ⁻¹ (¹⁵ N-engrais)	Résidus	9,30 (2,4) _a	12,92 (3,4) _a	62,84 (5,5) _a	87,08 (2,9) _a
	Racines	0,79 (2,0) _b	13,19 (1,6) _a	5,27 (1,4) _b	86,81 (1,4) _a
	Graines	9,16 (3,7) _a	16,05 (6,8) _a	48,31 (4,8) _a	83,95 (5,9) _a
	Total	19,25 (5,6)	14,15 (3,9)	116,42 (7,7)	85,85 (3,4)

§: les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

§§: dans la même colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement (P = 0,05) différentes

Absorption de l'azote de l'engrais marqué au traceur ^{15}N par la culture du tournesol. Le pourcentage de N dérivé de l'engrais enrichi en ^{15}N dans la plante du tournesol (% Ndff) était de 14.8 et 14.2 % respectivement dans les parcelles de T1 et T2 (Tableau 4). Cette faible valeur témoigne d'une très faible utilisation de l'azote de l'engrais par la culture du tournesol relativement à l'azote du sol. Une faible valeur du % Ndff de 19 % a été aussi rapportée par Merrien (1992) pour une dose semblable de N de l'engrais (80 kg N ha⁻¹).

Le tournesol a donc dérivé la plupart de son azote à partir du sol soit 85.2 et 85.9 % respectivement dans les parcelles de T1 et T2 (Tableau 4). Merrien (1992) a rapporté que les 2/3 et même plus de l'azote absorbé par le tournesol proviennent du sol. Cette faible utilisation de l'azote de l'engrais par rapport à l'azote du sol peut avoir plusieurs explications : (i) Le tournesol possède un fort potentiel de développement racinaire susceptible d'exploiter les reliquats azotés des profils du sol les plus lointains (Dardanelli *et al.*, 1997) (ii) une grande disponibilité de N minéral dans le sol d'expérimentation entraînant une augmentation du rapport N minéral du sol disponible / N de l'engrais disponible (Corbeels, 1997). (iii) une organisation rapide d'une grande fraction de l'azote de l'engrais par les microorganismes du sol le transformant en formes organiques plus ou moins stables non disponibles pour la culture du

tournesol (Pilbeam *et al.*, 1995; Corbeels, 1997). (iv) adsorption d'une quantité de l'ammonium de l'engrais par les colloïdes du sol (Corbeels, 1997) ce qui diminue sa disponibilité pour la culture. (v) une forte minéralisation de l'azote du sol au cours de la saison de croissance du tournesol peut aussi être la cause d'une forte disponibilité de l'azote minéral du sol pour la culture.

La fraction de l'azote de la plante dérivé à partir de l'engrais était presque uniformément répartie dans les différentes parties de la plante avec 15.9 et 16.1 % dans les graines, 13.8 et 12.9 % dans les résidus aériens et 13.7 et 13.2 % dans les racines, respectivement dans les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 4). Cette similitude entre les valeurs de % Ndff dans les différentes parties de la plante a été aussi rapportée par Corbeels (1997), Corbeels *et al.* (1999) et Ichir *et al.* (2003) pour la culture du blé. D'autres chercheurs par contre, travaillant sur différents systèmes de cultures, ont noté une différence significative entre les valeurs de % Ndff dans les différentes parties de la plante avec les meilleures valeurs pour les graines (Tran *et al.*, 1996 ; Tran et Trambly, 2000 et Malhi *et al.*, 2004)

Le coefficient réel d'utilisation de l'azote de l'engrais enrichi en ^{15}N (CUR) par la culture du tournesol était faible de l'ordre de 24.7 et 24.1 % respectivement pour les parcelles de T1 et T2 (Tableau 5). Ces valeurs sont largement inférieures à la valeur de 51 % de moyenne rapportée par Scheiner *et al.* (2002). Cette faible utilisation de

TABLEAU 5. Recouvrement de N de l'engrais dans la plante du tournesol

Partie de la plante	T ₁		T ₂	
	CUR	CUA	CUR	CUA
Résidus	11,99 (2,4) ^{§a§§} 48,9 % ^{§§§}		11,62 (3,0) ^a 49,2 %	
Racines	0,95 (0,3) ^b 3,8 %		0,99 (0,3) ^b 4,2 %	
Graines	11,72 (3,1) ^a 47,3 %		11,45 (4,7) ^a 46,6 %	
Total	24,67 (3,4)	21,76 (2,3)	24,06 (6,1)	23,72 (5,9)

§: les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

§§: dans la même colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement (P = 0,05) différentes

§§§: Distribution de l'azote de l'engrais dans les différentes parties de la plante

l'azote de l'engrais par le tournesol peut être attribuée en grande partie au fort degré d'organisation de l'azote de l'engrais dans le sol qui est considéré comme un processus inévitable qui a lieu durant la saison de croissance des cultures (Blankenau *et al.*, 2000). Des quantités substantielles de l'azote de l'engrais, pouvant aller jusqu'à 50 %, peuvent être organisées par les micro-organismes du sol (Blankenau et Kuhlmann, 2000). D'autres facteurs peuvent aussi expliquer cette faible valeur de % CUR : (i) la grande capacité du sol d'expérimentation à la minéralisation de l'azote du sol en conditions d'irrigation durant le cycle de croissance et du développement du tournesol « mars – juillet » (Badraoui *et al.* 2001) (ii) la perte d'une quantité de l'azote de l'engrais par dénitrification, volatilisation ou lessivage entraînant une diminution de la disponibilité de cet azote pour la culture (Limaux *et al.*, 1999) (iii) L'incorporation au sol des résidus de récolte de la culture de pomme de terre cultivée l'année précédente sur les parcelles de l'essai. Il a été rapporté en effet, que cette pratique augmente la fourniture de l'azote par le sol, ce qui réduit le besoin de la culture courante en azote de l'engrais (Eagle *et al.*, 1999) comme elle augmente l'organisation de l'azote de l'engrais par les micro-organismes du sol entraînant une diminution de sa disponibilité pour la culture courante (Blankenau et Kuhlmann, 2000) (iv) la pratique de l'irrigation dans notre expérimentation. Strong, 1995 a rapporté que des

faibles valeurs du CUR sont généralement associées à des situations extrêmes de disponibilité de l'eau (sécheresse ou bien Pluviométrie ou irrigation excessive).

ANI ou interactions de l'azote ajouté. Les quantités d'azote dérivé par la plante à partir du sol (Ndfs) ont été déduites à partir des valeurs % Ndfs et des valeurs du prélèvement en azote total de la plante dans les parcelles fertilisées à l'engrais enrichi en ^{15}N . Les valeurs Ndfs de la culture du tournesol, étaient de 114.4 et 116.4 kg ha⁻¹ respectivement dans les parcelles de T1 et T2 (Tableau 4). Ces valeurs étaient similaires à la valeur moyenne du prélèvement en azote total dans les parcelles témoins non fertilisées qui était de 116.7 kg ha⁻¹ (Tableau 3).

Ces résultats montrent que l'apport de N n'a pas stimulé l'utilisation de l'azote du sol par la plante. Ce qui indique que l'ANI n'avait pas un effet majeur sous les conditions de notre expérimentation. Un résultat semblable a été rapporté par Tran et Tremblay (2000) pour la culture du blé et par Mac Donald *et al.* (1997) pour différents systèmes de cultures installés sous des conditions pédo-climatiques variées. L'absence de ANI peut être expliquée par une grande disponibilité en azote dans le sol de l'expérimentation (Torbert *et al.*, 1992)

Le coefficient apparent d'utilisation de N de l'engrais par la plante entière du tournesol (CUA), estimé par la méthode de différence était de 21.7 et 23.7 % respectivement pour les traitements T1

TABLEAU 6. Distribution de l'azote de l'engrais résiduel dans le profil du sol jusqu'à 0,9 m de profondeur à la récolte du tournesol

Traitement	Profondeur en cm	N de l'engrais résiduel dans le sol		
		Kg ha ⁻¹	Distribution (%)	% Rec sol
(T ₁) 80 kg N. ha ⁻¹ (¹⁵ N-engrais)	0 – 30	27.96a [§] (1.9) ^{§§}	68.4a (2.4)	34.95a (2.4)
	30 – 60	10.9b (0.5)	26.7b (1.1)	13.62b (0.6)
	60 – 90	2.0c (0.5)	4.9c (1.3)	2.5c (0.6)
	Total	40.85 (1.8)		51.07 (2.3)
(T ₂) 80 kg N. ha ⁻¹ (¹⁵ N-engrais)	0 – 30	27.06a (2.7)	67.5a (4.8)	33.83a (3.4)
	30 – 60	11.02b (1.6)	27.6b (4.0)	13.77b (2.0)
	60 – 90	1.94c (0.5)	4.9c (1.4)	2.42c (0.7)
	Total	40.02 (2.0)		50.02 (2.5)

§: dans la même colonne, les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement ($P \geq 0,05$) différentes
 §§: les valeurs entre parenthèse correspondent aux erreurs standards

et T2 (Tableau 5). Ces valeurs sont similaires aux valeurs de CUR estimées par la méthode isotopique.

La technique de différence n'a donc pas surestimé l'utilisation de N de l'engrais par la plante. Au contraire, les valeurs de CUA ont été légèrement, bien que non significativement ($P = 0.05$), inférieures que celles de CUR (Tableau 5). Plusieurs chercheurs ont rapporté que lorsqu'il n'y a pas de ANI, les valeurs du CUA et CUR sont similaires (Schindler et Kinghton, 1999; Tran et Trambly, 2000). Ceci concorde avec nos résultats.

Dans la littérature, on a souvent comparé les deux techniques (isotopique et de différence). Nombreux chercheurs ont rapporté que la méthode de différence surestime les taux de recouvrement en N de l'engrais dans la plante par rapport à la méthode isotopique. Ils expliquent ceci par les phénomènes de substitution des pools de N dans le sol (Macdonald *et al.*, 1997; Eagle *et al.*, 2001; Mohammad, 2004). D'autres chercheurs n'ont par contre pas trouvé de différence significative entre les valeurs de CUA et CUR calculés par les deux techniques. Ce qui concorde avec nos résultats (Norton et Silvertooth, 1999; Schindler et Kinghton, 1999; Tran et Trambly, 2000).

En général les phénomènes de ANI sont rarement observés dans les expérimentations conduites au champ (Norton et Silvertooth, 1999) Azote de l'engrais enrichi en ^{15}N résiduel dans le sol à la récolte du tournesol. La distribution de l'azote de l'engrais enrichi en ^{15}N dans le profil du sol, jusqu'à 0.9 m de profondeur, a été examinée après la récolte du tournesol. Les résultats sont représentés sur le Tableau 6. Les taux de

recouvrement en N de l'engrais dans les différentes zones du profil (% Rec sol) sont aussi représentés sur ce tableau. La moitié de la dose de l'azote de l'engrais marqué au ^{15}N , appliqué au tournesol, sont restés dans le profil du sol jusqu'à 0.9 m de profondeur. La plus grande fraction de cet azote (68.4 et 67.5 % pour T1 et T2 respectivement) est restée dans la zone superficielle du profil (0 – 30 cm). Elle correspond à 34,9 et 33.8 % de l'azote de l'engrais appliqué, respectivement pour T1 et T2 (Tableau 6) Une part non négligeable de l'azote de l'engrais résiduel (26.7 et 27.6 % pour T1 et T2) est restée dans la zone 30 – 60 cm du profil, soit 14 % de l'azote de l'engrais appliqué au tournesol. Pas plus de 5 % de l'azote résiduel (2.5 % de l'azote appliqué) sont retrouvés dans la zone la plus profonde (60 – 90 cm) du profil examiné. Nos résultats montrent bien que la migration de l'azote de l'engrais dans le profil du sol était faible, probablement du fait que les processus concurrents d'organisation et de pertes, interviennent précocement et plus rapidement que les transferts de l'azote dans le profil (Recous *et al.*, 1997). Cette faible valeur de l'azote de l'engrais dans la zone (60-90 cm) indique que les pertes par lessivage qui ont probablement eu lieu durant la saison de croissance du tournesol, n'étaient pas trop importantes sous les conditions de notre expérimentation.

L'azote de l'engrais retrouvé dans la zone superficielle du profil du sol (0 – 30 cm), correspond surtout à l'azote qui n'a pas pu être absorbé par la plante du tournesol. Une fraction de cet azote peut rester dans le sol sous forme minérale à la récolte de la culture. Sa quantité exacte n'est pas déterminée (pas de mesures de

TABLEAU 7. Bilan de l'azote de l'engrais enrichi en ^{15}N à la récolte du tournesol

Traitement	N de l'engrais							
	Plante entière		Sol (0 – 90 cm)		Plante + sol		N non récupéré	
	Kg ha ⁻¹	%						
T1	19.73 (3.1)§	24.67 (3.9)	40.85 (1.8)	51.07 (2.3)	60.59 (3.8)	75.73 (4.8)	19.41 (3.8)	24.27 (4.8)
T2	19.25 (5.6)	24.06 (7.0)	40.02 (2.0)	50.02 (2.5)	59.27 (6.5)	74.09 (8.1)	20.73 (6.5)	25.91 (8.1)

§: les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

reliquat d'azote minéral dans le sol). Mais généralement, elle est minimale quand la quantité d'azote appliquée ne se situe pas au delà de l'optimum de réponse à l'azote de la culture (Strong, 1995). Une petite part de l'azote trouvé dans cette zone du profil peut aussi provenir des exsudats racinaires, d'autant plus que les plantes de tournesol n'ont été récoltées qu'à leur maturité. Mais, la plus grande part de cet azote était probablement sous forme organique non disponible pour la plante (azote organisé par les microorganismes du sol).

Bilan de l'azote de l'engrais enrichi à la récolte du tournesol. Des 80 kg N ha⁻¹ appliqués au tournesol, 19.7 et 19.3 kg N ha⁻¹ soit 24.7 et 24.1 % de l'azote ont été récupérés par la culture respectivement sur les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 7). 51.1 et 50 % de azote sont restées dans le profil du sol, à la récolte du tournesol respectivement sur les parcelles de T1 et T2 (Tableau 7). Donc 75,8 et 74.1 % de l'azote de l'engrais appliqué au tournesol sont récupérés par le système plante – sol respectivement sur les parcelles des traitements T1 et T2. Ces valeurs ne sont pas trop loin de la valeur moyenne de 80 % proposée par Pilbeam (1996) dans un ensemble d'expérimentations conduites sous des conditions pédo-climatiques variées. 24.3 et 25.9 % de l'azote de l'engrais appliqué au tournesol n'ont pas pu être récupérés par le système plante – sol des parcelles de T1 et T2 respectivement (Tableau 7). Nannipieri *et al.* (1999) ont rapporté que la fraction d'azote non récupéré par le système plante – sol est généralement rangée entre 20 % et 40 % de l'azote appliqué et dépend surtout des pertes de l'azote du fertilisant par volatilisation, lessivage ou dénitrification. Dans notre essai, la pratique de l'irrigation ainsi que les quantités de précipitations survenues au moment de l'application de l'azote du fertilisant pourraient être à l'origine de pertes par lessivage d'une quantité d'azote du fertilisant au delà de la zone racinaire (Theocharopoulos *et al.*, 1993). Les quantités de l'azote de l'engrais retrouvé dans la zone 60 – 90 cm du profil du sol en témoignent. Cependant, les pertes par lessivage n'étaient probablement pas considérables. Le pH du sol (> 8) peut aussi être à l'origine de pertes de N par lessivage ou par dénitrification. En effet, la conversion de l'ammonium en nitrate à lieu plus rapidement dans les sols à pH élevé en comparaison

TABLEAU 8. Rendements en MS et le prélèvement en azote total des cultures des trois saisons suivantes (blé - tournesol - blé)

Culture	Traitement	Rendements en matière sèche (q ha ⁻¹)			Prélèvement en azote total (kg ha ⁻¹)				
		Résidus	Racines	Graines	Total	Résidus	Racines	Graines	Total
Blé	T ₁ (AR)	64,81 (7,0)	8,1 (0,4)	25,4 (2,2)	98,3 (8,5)	69,6 (7,1)a§	6,0 (0,7)b	78,0 (6,9)a	153,6 (13,4)
	T ₂ (SR)	67,3 (4,5)	8,0 (0,2)	28,4 (2,3)	103,7 (6,2)	75,5 (6,0)a	6,5 (1,2)b	84,2 (8,2)a	166,2 (9,7)
Tournesol (3 ^{ème} culture)	T ₁ (AR)	86,4 (4,8)	11,7 (0,4)	19,8* (2,4)	117,9 (5,8)	66,4 (12,9)a	3,2 (1,1)b	48,9 (4,1)a	118,5 (14,3)
	T ₂ (SR)	87,9 (5,3)	11,4 (0,4)	25,8 (3,4)	125,0 (12,3)	62,2 (6,3)a	2,6 (0,3)b	59,9 (12,3)a	124,7 (9,6)
Blé (4 ^{ème} culture)	T ₁ (AR)	66,8* (13,7)	11,5 (0,2)	23,8* (2,2)	102,1 (15,3)	71,7 (14,4)a	8,4 (0,7)b	73,1* (6,9)a	153,3* (20,7)
	T ₂ (SR)	46,6 (14,7)	10,0 (0,1)	16,05 (2,4)	72,5 (13,3)	53,0 (18,9)a	8,1 (1,3)b	47,5 (8,1)a	108,5 (15,4)

* : valeur significativement différente (P≤0,05) à celle du traitement T2

§ : dans la même ligne, les valeurs du prélèvement en NT suivies des lettres différentes sont significativement (P≤0,05) différentes

§ : les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

avec les sols à pH faible et cette conversion rapide rend l'azote plus vulnérable aux pertes (Blackmer *et al.*, 2000).

Des pertes gazeuses de l'ammonium de l'engrais par volatilisation, nitrification et/ou dénitrification peuvent aussi être à l'origine de cette récupération incomplète de l'azote de l'engrais par le système plante – sol. Plusieurs conditions favorisant ces mécanismes des pertes étaient présentes dans notre expérimentation: (i) Le sol riche en calcaire (27 % de Ca CO₃) et à pH supérieur à 8 (Pilbeam et Hutchison, 1998 ; Blackmer *et al.*, 2000) (ii) la nature ammoniacale de l'engrais et le mode de son application en solution à la surface du sol (Pilbeam et Hutchison, 1998 ; Prasertsak *et al.*, 2002 ; Cai *et al.*, 2002). Cependant, dans notre essai, l'application de l'engrais azoté a été suivie dans un ou deux jours d'une irrigation afin de faire pénétrer l'azote de l'engrais dans le sol et éviter des pertes trop sévères par volatilisation.

La récupération incomplète de l'azote de l'engrais par le système plante – sol peut aussi être attribuée aux erreurs accumulées à l'échantillonnage et aux analyses (Hauck *et al.*, 1994).

Effets résiduels de la fertilisation azotée appliquée à la succession tournesol – blé – tournesol – blé avec ou sans enfouissement des résidus de tournesol. Le devenir de N de l'engrais résiduel dans le sol la récolte du tournesol a été suivi durant trois saisons successives et sous deux modes de gestion des résidus de tournesol : résidus

enfouis dans le sol (T1) et résidus éliminés (T2).

Rendements en matière sèche et prélèvement de l'azote par les cultures. L'enfouissement des résidus de récolte de tournesol n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement en MST et le prélèvement en NT de la culture subséquente du blé. Une légère diminution du rendement en MST de 5.2 q ha⁻¹ et du prélèvement en NT de 12.6 kg ha⁻¹ a cependant été notée (Tableau 8). Mais, cette diminution était non significative (P = 0.05). Un résultat semblable a été rapporté par Morris et Parrish (1992) dans un essai conduit au champ avec des doses variables de résidus de récolte de tournesol. Selon les résultats rapportés dans la littérature, c'est rare que l'incorporation au sol des résidus de récolte des cultures ait un effet positif sur la première culture (Hood *et al.*, 1999; Eagle *et al.*, 2000). Ceci est en accord avec nos résultats.

Pour le tournesol (3^{ème} culture), bien que l'enfouissement des résidus de récolte a causé une diminution significative (P = 0.05) du rendement en grains de 23 % ; aucune différence significative n'a été notée dans les rendements en MST et en NT de cette culture entre les deux traitements T1 et T2.

Pour le blé (4^{ème} culture) par contre, une augmentation significative (P = 0.05) du rendement en grains a été notée avec l'enfouissement des résidus de tournesol. Le rendement en grains est passé de 16 q ha⁻¹ dans les parcelles T2 à 23.8 q ha⁻¹ dans les parcelles T1

TABLEAU 9. Utilisation de l'azote de l'engrais enrichi en ¹⁵N résiduel dans le sol à la récolte de du tournesol (1^{ère} culture) par les trois cultures subséquentes

Culture	Traitement	Source de l'azote				% d'utilisation de ¹⁵ N- engrais (CUR)
		L'engrais		Le sol§§		
		Ndff (kg ha ⁻¹)	% Ndff	Ndff (kg ha ⁻¹)	% Ndff	
Blé (2 ^{ème} culture)	T ₁ (AR)	1,4 (0,3)§	0,9 (0,1)	152,18 (13,2)	99,10 (0,1)	1,74 (0,3)
	T ₂ (SR)	1.64 (0.2)	0.99 (0.1)	164.53 (9.7)	99.01 (0.1)	20.5 (0.2)
Tournesol (3 ^{ème} culture)	T ₁ (AR)	2.93 (0.6)	2.46 (0.4)	115.61 (13.9)	97.54 (0.4)	3.66 (0.8)
	T ₂ (SR)	2.82 (0.5)	2.3 (0.3)	121.85 (9.2)	97.74 (0.3)	3.53 (0.6)
Blé (4 ^{ème} culture)	T ₁ (AR)	1.18 (0.2)*	0.77 (0.1)	152.08 (20.6)*	99.2 (0.1)	1.48 (0.2)*
	T ₂ (SR)	1.65 (0.2)	1.60 (0.4)	106.89 (15.5)	98.4 (0.4)	2.06 (0.2)

§: les valeurs entre parenthèses correspondent aux valeurs standards

§§: azote provenant du sol, de l'engrais non enrichi en ¹⁵N appliqué au semis et des résidus

*: valeur significativement différente (P = 0,05) de celle du traitement SR

(tableau VIII). Le prélèvement total en azote a aussi été significativement ($P=0.05$) amélioré de 44.8 kg ha⁻¹ dans les parcelles de T1 par rapport aux parcelles de T2 (Tableau 8). Nos résultats montrent que l'enfouissement des résidus du tournesol dans la succession tournesol – blé – tournesol – blé ne commence à manifester ces effets sur les cultures qu'à la quatrième culture de la rotation. C'est à dire qu'après un deuxième enfouissement (celui des résidus du tournesol 3 de la succession). Cet effet positif de l'incorporation à long terme au sol des résidus de récolte des cultures a été rapporté par d'autres chercheurs (Eagle *et al.*, 2001 et Takahashi *et al.*, 2003). L'incorporation continue et à long terme au sol des résidus de récolte provoque en effet un changement dans les dynamiques de l'azote dans le sol ce qui se reflète positivement sur les rendements et l'alimentation azotée des cultures (Eagle *et al.*, 2001).

Prélèvement de ¹⁵N de l'engrais résiduel dans le sol à la récolte du tournesol par les cultures subséquentes. Les sources de N pour la culture du blé succédant le tournesol étaient : (i) l'azote de l'engrais marqué au ¹⁵N résiduel dans le sol à la récolte du tournesol, (ii) l'azote de l'engrais non enrichi de ¹⁵N appliqué à la culture au semis et (iii)

l'azote non marqué du sol. Les pourcentages de N de la plante du blé provenant de l'engrais résiduel marqué au ¹⁵N (Ndff) était très faibles de l'ordre de 0.9 et 1 % de moyenne, respectivement dans les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 9). La plante a donc dérivé en moyenne, 99 % de son azote à partir du sol et de l'azote non marqué appliqué au semis à la culture (Tableau 9).

Pour le tournesol suivant, l'azote de l'engrais enrichi en ¹⁵N résiduel comptait pour 2.5 et 2.3 % du prélèvement total en azote de la plante respectivement dans les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 9).

Pour le blé suivant (4ième culture), les pourcentages de N de la plante du blé provenant de l'engrais résiduel marqué au ¹⁵N, étaient aussi très faibles : 0.8 et 1.6 % respectivement dans les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 9). Ces faibles valeurs de % Ndff montrent que l'azote de l'engrais résiduel dans le sol à la récolte de la première culture du tournesol n'était pas sous une forme très disponible pour les cultures suivantes. Les sources d'azote disponibles pour ces cultures étaient principalement l'azote non marqué au ¹⁵N du sol et l'azote de l'engrais non enrichi en ¹⁵N appliqué au semis de ces cultures.

Les quantités élevées de l'azote enrichi en ¹⁵N

TABLEAU 10. N de l'engrais résiduel dans le sol (0 - 90 cm) à la récolte des cultures (blé – tournesol – blé)

Culture	Trait	Ndff (kg ha ⁻¹)				%Rec sol (0-90cm)
		0-30 cm	30-60 cm	60 - 90 cm	Total	
Blé (culture 2)	T1 (AR)	22.39a§(0.7)§§§	9.97a(b) (0.3)	3.17a(c) (0.3)	35.53a (1.1)	44.41a (1.4)
	T2 (SR)	63%§§§ 19.02b(a) (1.1) 61%	28% 9.32a(b) (0.7) 30%	9% 2.63b(c) (0.1) 9%	30.96b(1.6)	38.71a(2.0)
Tournesol (culture 3)	T1 (AR)	18.92a(a)(0.4)	8.90a(b) (0.8)	3.89a(c) (0.2)	31.71a(0.9)	39.64a(1.2)
	T2 (SR)	60% 14.33b(a)(1.1) 56%	28% 7.75a(b)(0.8) 30%	12% 3.68b(c)(0.2) 14%	25.76b(1.6)	32.19b(2.0)
Blé (culture 4)	T1 (AR)	15.55a(a)(0.4)	7.97a(b)(0.5)	4.8a(c) (0.4)	28.36a(0.7)	35.46a(0.9)
	T2 (SR)	55% 10.95b(a) (1.1) 50%	28% 6.95a(b) (0.8) 32%	17% 3.86b(c)(0.2) 18%	21.76b(1.5)	27.1b(2.0)

§: différence entre T1 et T2. Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement ($P \geq 0,05$) différentes.
 §§: différence entre les profondeurs. Les valeurs suivies de la même lettre ne sont pas significativement ($P \geq 0,05$) différentes.

§§§ : les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

§§§§: distribution de N résiduel dans le profil du sol

restées dans le sol à la récolte de la première culture de tournesol (Tableau 6) étaient théoriquement disponibles aux cultures suivantes. Cependant, l'utilisation de ces reliquats en azote par le blé subséquent était très faible. Les taux de CUR n'étaient que de 1.7 et 2. % respectivement dans les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 9). Dans la plupart des études sur le devenir de N de l'engrais marqué au ^{15}N au-delà de la saison de son application, les taux d'utilisation de N de l'engrais résiduel par la culture suivante sont généralement faibles variant de 0.6 à 8 %. Ce qui concorde avec nos résultats (Corbeels, 1997 ; Eagle *et al.*, 2000, 2001 ; Glendining *et al.*, 2001 ; Kumar et Goh, 2002 ; Ichir *et al.*, 2003 ; Phóngpan et Mosier, 2003).

Les quantités de cet azote résiduel mobilisées par les cultures du tournesol puis du blé cultivées les deux saisons suivantes étaient aussi très faibles 3.7 et 3.5 % pour la culture du tournesol et 1.5 et 2.1 % pour le blé respectivement dans les parcelles de T1 et T2 (Tableau 9).

Ces faibles taux de récupération des cultures suivantes en dépit du haut niveau en ^{15}N de l'engrais résiduel peuvent être expliqués par une importante organisation de l'azote de l'engrais appliqué durant la période qui suit la récolte de la culture du tournesol (Recous *et al.*, 1997). Cet azote organisé devient partiellement stabilisé dans la fraction humique et sa susceptibilité à la re-minéralisation

immédiat reste faible. Les taux de récupération de ^{15}N de l'engrais résiduel par les trois cultures successives, en témoignent indirectement. Cependant ces taux de récupération, bien qu'ils soient faibles, ils restent un bon indicateur de la re-minéralisation de l'azote de l'engrais organisé. Ils montrent également qu'un apport d'azote peut avoir un effet à long terme au-delà du cycle sur lequel il a été appliqué. Le raisonnement d'un apport d'azote doit donc toujours prendre cet effet en considération.

L'enfouissement des résidus de récolte de la culture du tournesol n'a pas eu d'effet significatif sur l'utilisation de l'azote de l'engrais résiduel enrichi en ^{15}N par le blé et le tournesol, cultivés respectivement à la première et la deuxième saison qui suit l'enfouissement. Les valeurs de CUR et de % Ndff étaient sensiblement similaires pour les deux traitements T1 et T2 (Tableau 9). Un résultat semblable a été rapporté par Kumar et Goh, (2002) pour les résidus du blé et du ray-grass. Pour la 4^{ème} culture du blé, par contre, l'enfouissement des résidus a provoqué une diminution significative ($P = 0.05$) de 28.2 % des taux d'utilisation de l'azote de l'engrais enrichi résiduel par la culture (Tableau 9). Les valeurs de % Ndff ont aussi été réduites de moitié avec l'enfouissement des résidus de récolte du tournesol (Tableau 9).

Azote de l'engrais enrichi en ^{15}N résiduel dans

TABLEAU 11. Bilan de l'azote de l'engrais enrichi en ^{15}N à la récolte du blé (4^{ème} culture)

		N de l'engrais enrichi en ^{15}N			
		T1 (AR)	T2 (SR)	T1 (AR)	T2 (SR)
		Kg ha ⁻¹	%	Kg ha ⁻¹	%
Plante	Tournesol (culture 1)	19.73	24.67	19.25	24.06
	Blé (culture 2)	1.4	1.74	1.64	2.05
	Tournesol (culture 3)	2.93	3.66	2.82	3.53
	Blé (culture 4)	1.18	1.48	1.65	2.06
	Total	25.24	31.55	25.36	31.7
Sol à la récolte du blé (4 ^{ème} culture)	0 – 30 cm	15.55	19.44	10.95	13.69
	30 – 60 cm	7.97	9.96	6.95	8.68
	60 – 90 cm	4.84	6.06	3.86	4.82
	Total	28.36	35.46	21.76	27.19
Total Plante + sol		53.60	47.12	67.01	58.89
N de l'engrais non récupéré		26.4	32.88	32.99	41.11

le sol à la récolte de chaque culture. La distribution de l'azote de l'engrais marqué au ^{15}N résiduel dans le profil du sol, a été étudiée à la récolte de chaque culture. Les résultats sont représentés sur le tableau X. L'azote total de l'engrais enrichi dans le profil du sol jusqu'à 0.9 m de profondeur a diminué d'un cycle végétal à l'autre : sur les parcelles du traitement T1, il est passé de 40.85 kg N ha⁻¹ récolte de la première culture du tournesol (Tableau 6) à 35.53 kg N ha⁻¹ à la récolte du blé suivant, puis à 31.761 kg N ha⁻¹ à la récolte du tournesol suivant et enfin à 28.4 kg N ha⁻¹ à la récolte de la dernière culture de blé (Tableau 10). Sur les parcelles du traitement T2, les quantités de N de l'engrais résiduel dans le sol sont passées de 40.02 kg N ha⁻¹ à la récolte de la première culture de tournesol à 30.96, 25.76 et 21.76 kg N ha⁻¹ à la récolte de la deuxième, troisième et la quatrième culture respectivement (Tableau 10). Cette diminution des taux de recouvrement du sol en azote l'engrais, a intéressé surtout la zone superficielle du profil (0 – 30 cm) où la quantité d'azote du sol dérivant de l'engrais enrichi (Ndff) a diminué de presque 50 % depuis la récolte de la première culture du tournesol jusqu'à la récolte de la dernière culture de blé (Tableau 10). Ceci peut avoir plusieurs explications : tout d'abord, cette zone est généralement la zone d'absorption racinaire des cultures, c'est aussi la zone de pertes de N par dénitrification. La quantité d'azote de l'engrais marqué au ^{15}N retrouvée dans la zone la plus profonde du profil (60 – 90 cm) a subi au contraire une augmentation d'un cycle végétal à l'autre. Elle est passée de 1.47 kg N ha⁻¹ à la récolte de la première culture de tournesol (Tableau 6) à 4.84 et 3.86 kg N ha⁻¹ à la récolte de la quatrième culture de blé, respectivement dans les parcelles de T1 et T2 (Tableau 10). Cette augmentation témoigne de la migration de cette forme d'azote dans le profil du sol probablement sous l'effet de la pratique de l'irrigation dans notre essai.

Les taux de récupération du sol, jusqu'à 0.9 m de profondeur, en ^{15}N de l'engrais (% Recsol) sont passés de 50 % à la récolte de la première culture du tournesol (Tableau 6) à 35.5 et 27.2 % à la récolte de la quatrième culture du blé respectivement dans les parcelles de T1 et T2. Ces quantités considérables de ^{15}N restant dans le sol à la récolte de la quatrième culture montrent

qu'une grande part de cette azote récupéré par le sol était sous une forme stable.

L'enfouissement des résidus de tournesol, a nettement amélioré, les taux de récupération du sol en ^{15}N de l'engrais (% Recsol) qui sont passés de 38.7 % à 44.4 % à la récolte du blé (2ième culture), de 32.2 % à 39.6 % à la récolte du tournesol (3ième culture) et de 27.2 % à 35.5 % à la récolte la quatrième culture du blé (Tableau 10). Cet effet positif de l'enfouissement dans le sol des résidus de cultures sur les taux de recouvrement de l'azote de l'engrais dans le sol a été aussi rapporté par différents chercheurs (Ichir, 2002 ; Rosenani *et al.*, 1999).

Bilan de N de l'engrais enrichi en ^{15}N à la récolte de la quatrième culture du blé. Les taux de récupération totale de l'azote de l'engrais marqué au ^{15}N par l'ensemble des quatre cultures a été en somme de 31.55 et 31.7 % de l'azote appliqué à la première culture de tournesol respectivement dans les parcelles des traitements T1 et T2 (Tableau 11). La plus grande part de cet azote (~ 80% du taux de récupération total) a été récupéré par la première culture du tournesol. Le reste a été récupéré par l'ensemble des trois cultures subséquentes. L'enfouissement au sol des résidus du tournesol n'a pas eu d'effet significatif sur le taux de récupération totale en azote de l'engrais par l'ensemble des quatre cultures.

Le taux de recouvrement du sol (à 0.9 m de profondeur) en azote de l'engrais enrichi en ^{15}N , à la récolte de la quatrième culture du blé, ont été estimés à 35.46 et 27.19 % dans les parcelles de T1 et T2 respectivement (Tableau 11). L'azote de l'engrais enrichi en ^{15}N non récupéré par (l'ensemble des quatre cultures + le sol jusqu'à 0.9 m de profondeur) a été de 32.99 et 41.11 % respectivement dans les parcelles de T1 et T2 (Tableau 11). L'enfouissement au sol des résidus de tournesol a donc significativement amélioré de la récupération de l'azote de l'engrais marqué au ^{15}N par le sol et a diminué, de plus de 8 %, les pertes de cette forme d'azote.

CONCLUSION

Sous les conditions de notre expérimentation, la fertilisation azotée à la dose de 80 kg N ha⁻¹ n'avait pas d'effets significatifs sur le rendement grain du tournesol, ceci peut être dû à une grande

disponibilité en nitrate dans le sol au semis de la culture. Le taux de récupération de N de l'engrais enrichi en ^{15}N par la culture du tournesol (parties aériennes et racines adventices jusqu'à 20 cm de profondeur) était faible (24.4 %). L'ANI n'avait pas un effet majeur sous les conditions de notre expérimentation puisque les quantités de N des plantes dérivé à partir du sol dans le témoin non fertilisé et le traitement fertilisé étaient semblables. La méthode de différence n'a pas surestimé le taux d'utilisation de N de l'engrais par le tournesol par rapport à la technique isotopique. Le recours à la technique isotopique n'est donc pas nécessaire dans une expérimentation dont l'unique but est d'étudier l'utilisation de N de l'engrais par la culture. La technique de différence moins chère et plus simple suffira pour atteindre ce but.

La récupération de l'azote de l'engrais par le système plante / sol à la récolte du tournesol, n'a pas été totale. Un déficit de 25 % de l'azote appliqué a été estimé. Les explications données dans notre étude (pertes de N de l'engrais par dénitrification volatilisation et lessivage) sont hypothétiques puisque les émissions gazeuses et la migration de ^{15}N de l'engrais au-delà de la zone racinaire (0–90 cm), n'ont pas été mesurées. Les conditions de notre expérimentation favorisaient néanmoins des pertes non négligeables de N par dénitrification ou par lixiviation.

En dépit des grandes quantités d'azote résiduel restées dans le profil du sol à la récolte du tournesol, les quantités de l'azote de l'engrais marqué mobilisées par les cultures suivantes étaient faibles : Le taux de récupération total par l'ensemble des trois cultures n'avait pas excédé 7 % de l'apport initial. Ce ci indique que cet azote était sous une forme organique peu disponible pour les cultures et sa re-minéralisation était partielle et lente. A la récolte de la quatrième culture du blé, des quantités importantes de l'azote de l'engrais (33 à 41 %) étaient encore présentes dans le profil du sol suggérant un effet à plus long terme de l'apport initial de N. Une telle donnée doit, en effet, être prise en considération lors de la gestion de la fertilisation azotée du tournesol.

L'enfouissement des résidus du tournesol tel qu'il a été pratiqué dans notre essai, n'a pas eu d'effet significatif sur les taux de récupération de l'azote de l'engrais marqué résiduel par les trois cultures suivantes. Il a provoqué par contre, une

augmentation significative des taux de recouvrement du sol (0–90 cm) en cette forme d'azote. Il a provoqué également une réduction considérable des pertes de cet azote hors du système plante – sol.

D'un autre côté, L'enfouissement des résidus de récolte du tournesol n'a pas eu d'effet significatif sur le rendement grain de la première et la deuxième culture. C'est à la troisième saison et après un second enfouissement (résidus de récolte du tournesol de la deuxième rotation) que cet effet s'est manifesté par une amélioration des rendements grains et de l'alimentation azotée de la culture du blé. Les agriculteurs marocains qui généralement utilisent les résidus de récolte du tournesol à des fins domestiques doivent prendre conscience des effets positifs de l'incorporation continue et à long terme des résidus de tournesol sur la qualité du sol et sur la productivité des cultures. D'autres études sont cependant requises sur ce sujet.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leur gratitude aux responsables de l'Agence internationale de l'énergie atomique à Vienne et du laboratoire d'analyse d' ^{15}N à Seidersdorf, principalement aux Dr. F. Zapata et Dr. K.S. Kumarasinghe.

BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboudrare, A. 2000. Stratégies de stockage et d'utilisation de l'eau pour le tournesol pluvial dans la région de Meknes. Thèse de Doctorat Es – Sciences Agronomiques. pp. 175
- Ashraf, M., Mahmood, F. A. and Qureshi, R.M. 2004. Comparative effect of applying leguminous and non-leguminous green manures and inorganic N on biomass yield and nitrogen uptake in flooded rice (*Oryza sativa* L.). *Biology and Fertility of Soil* 40: 147 – 152.
- Axmann, H. 1990. Methods for ^{15}N determination. In: Use of Nuclear Techniques in Studies of Soil-plant Relationships, Training Course Series n° 2, IAEA, Vienna. pp. 55 – 60.
- Axmann, H., Sebastianelli, A. and Arrillaga, J.L. 1990. Sample preparation techniques of biological materiel for isotope analysis. In:

- Use of Nuclear Techniques in Studies of Soil-plant Relationships, Training Course Series n° 2, IAEA, Vienna, Austria. pp. 41- 54.
- Badraoui, M. 2001. Fertilisation du tournesol. Stage de formation sur la conduite du tournesol ITH de Meknes Maroc. 11p.
- Badraoui M., Agbani M., Bouabid R. et Zerouali M. 2001. Mieux fertiliser le tournesol en irrigué : Nouvelles normes pour la région du Gharb. Transfert de Technologie en Agriculture N° 80. 4 p.
- Blankenau, K. and Kuhlmann, H. 2000. Effect of N supply on apparent recovery of fertilizer N as crop N and Nmin in soil during and after cultivation of winter cereals. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 163:91 – 100.
- Blankenau, K., Olf, H. W. and Kuhlmann, H. 2000. Effect of microbial nitrogen immobilization during the growth period on the availability of nitrogen fertilizer for winter cereals. *Biology and Fertility of Soils* 32:157 – 165.
- Blackmer, A. M., Kyveryga, P. M. and Isla, R. 2000. Soil pH and Losses of fall-applied ammonia. In: Soil Fertility, Integrated Crop Management. Iowa State University, URL: <http://www.jp.m.iastate.edu/ipm/icm/2000/8-21-2000/falloss.html>
- Bremner, J. M. 1965. "Total Nitrogen", Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties. Black, C. A. et al. (Eds.). American Society of Agronomy, Madison, WI. pp. 1149.
- Cai, G., Chen, D., While, R. E., Fan, X. H., Pacholski, A., Zhu, Z. L. and Diang, H. 2002. Gaseous nitrogen losses from urea applied to maize on a calcareous fluvo-aquic soil in North China plain. *Australian journal of Soil Research* 40:737 - 748
- CETIOM, 1995. Le tournesol en 95 : Le contexte économique, les techniques culturales et les ébauchés, Fiche technique (Ed.) CETIOM.
- Corbeels, M. 1997. Nitrogen availability and its effect on water limited wheat growth on vertisols en Morocco. Ph.D. thesis. University of gent Belgium. 299 p.
- Corbeels, M., Hofman, G. and Van Cleemput, O. 1999. Fate of fertiliser N applied to winter wheat growing on a vertisol in a Mediterranean environment. *Nutrient cycling in Agroecosystems* 53:249 – 258.
- Dardanelli, J.L., Bachmeier, O.A., Sereno, R. and Gil, R. 1997. Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haptustoll. *Field Crops Research* 54: 29–38.
- Dimanche, P.H. 1997. Impacts de différents itinéraires techniques du travail du sol sur la dégradation des sols argileux dans la région de Meknès (Maroc), Thèse de Doctorat Es Sciences Agronomiques, Belgique. pp. 268
- Eagle, A.J., Bird, J.A., Hill J.E., Horwath W.R. and Van Kessel C. 2001. Nitrogen Dynamics and Fertilizer Use Efficiency in Rice following straw incorporation and winter flooding. *Agronomy Journal* 93 :1346–1354.
- Eagle, A.J., Bird J.A., Van kessel C. and Horwath W. 1999. Rice Yield nitrogen utilisation efficiency as affected by alternative residue management practices and winter flooding. In Report of the third research co-ordination meeting of the FAO / IAEA coordinated research project on the use of isotope techniques in studies on the management of organic matter and nutrient turnover for increased sustainable agricultural production and environmental preservation (D1 – 44.08) NSMI, Rabat, Morocco.
- Eagle, A.J., Bird, J.A., Horwath, W.R., Linquist, B.A., Brouder, S.M., Hill, J.E. and Kessel, C.V. 2000. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices. *Agronomy Journal* 92:1096 – 1109.
- El Asri, M. 2001. Rotations incluant le tournesol. Stage de formation sur la conduite du tournesol. ITH Meknès, Maroc.
- FAO, 2002. World Agriculture: Towards 2015 – 2030. Erthscan (Ed.). England, 16 – 06 – 2002.
- Glendining, M.J., Poulton, P.R., Powlson, D.S., Macdonald, A.J. and Jenkinson, D.S. 2001. Availability of the residual nitrogen from a single application of ¹⁵N-labelled fertilizer to subsequent crops in a long-term continuous barley experiment. *Plant and soil* 233:231 – 239.
- Hauck, R.D., Meisinger, J.J. and Mulvaney, R.L. 1994. Practical considerations in the use of

- nitrogen tracers in agricultural and environmental research. In: *Methods of Soil analysis. Part 2 – Microbiological and Biochemical Properties*. R. W. Weaver, S. Angle, P. Bottomley, D. (Eds.).
- Hood, R.C., N'Goran, K.; Aigner, M., Hardarson, G. 1999. A comparison of direct and indirect ^{15}N isotope techniques for estimating crop N uptake from organic residues. *Plant and Soil* 208:259 – 270.
- Ichir, L.L. 2002. Incorporation des résidus du blé dans le sol et fertilisation azotée du blé sous différents traitements d'irrigation au sud du Maroc. Thèse de Doctorat d'Etat Es-Sciences Biologiques. Université Moulay Ismail, Meknès, Maroc.
- Ichir, L.L., Ismaili, M. and Hofman, G. 2003. Recovery of ^{15}N labelled wheat residues and residual effect of N fertilization in a wheat – wheat cropping system under Mediterranean conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66:201 – 207.
- INRA – CETIO – ASPOT, 1898. La culture du tournesol, Guide cultural, Maroc. pp. 1 – 15.
- Jenkinson, D.S., Fox, R.H. and Rayner, J.A. 1985. Interactions between fertilizer and soil nitrogen—the so-called 'priming effect'. *Journal of Soil Science* 36:425 – 444.
- Kumar, K. and Goh, K.M. 2002. Recovery of ^{15}N -labelled fertilizer applied to winter wheat and perennial rye grass crop and residual ^{15}N recovery by succeeding wheat crops under different crop residue management practices. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62:123 – 130.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard J.M. and Guckert, A. 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertilizer N application and fate of fertilizer N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214:49 – 59
- Macdonald A.J., Powlton P.R., Powlson D.S. and Jenkinson 1997. Effets of season, soil type and cropping on recoveries, residues and losses of ^{15}N -labelled fertilizer applied to arable crops in spring. *The Journal of Agricultural Science (Cambridge)* 129:125 – 154.
- Malhi, S. S., Johnston, A. M., Gill, K. S. and Pennock, D. J. 2004. Landscape position effects on the recovery of ^{15}N -labelled urea applied to wheat on two soils in Saskatchewan, Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68:85 – 93.
- Merrien, A. 1992. Physiologie du tournesol, Les points techniques du CETIOM, (Ed.), pp. 1 – 66. CETIOM.
- Mohammad, M. J. 2004. Utilization of applied nitrogen and irrigation water by brip-fertiligated squash as determined by nuclear and traditional techniques. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 68:1 – 11.
- Morris, P.J. and Parrish, D. J. 1992. Effects of sunflower residues and tillage on winter wheat. *Field Crops Research* 29:317-327.
- Nannipieri, P., Falchini, L., Landi, L., Benedetti, A., Canali, S., Tittarelli, F., Ferri D., Convertini, G., Badalucco, L., Grego, S., Vittori-Antisari, L., Raglione, M. and Barraclough, D. 1999. Nitrogen uptake by crops, soil distribution and recovery of urea-N in a sorghum – wheat rotation in different soils under Mediterranean conditions. *Plant and Soil* 208:43 – 56
- Norton, E.R and Silvertooth, J.C., 1999. Evaluation of the effects of added Nitrogen interaction on Nitrogen recovery efficiency Calculations. In the 1999 Arizona Cotton Report. The University of Arizona College of Agriculture. URL: <http://ag.arizona.edu/pubs/crops/az/23/>
- Phongpan, S. and Mosier A. R. 2003. Effect of crop residue management on nitrogen dynamic and balance in Lowland rice cropping system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 66:133 – 142.
- Pilbeam, C.J. 1996. Effect of climate on the recovery in crop and soil of ^{15}N -labelled fertilizer applied to wheat. *Fertilizer Research* 45:209 – 215.
- Pilbeam, C.J. and Hutchison, D. 1998. Fate of nitrogen applied in different fertilizers to the surface of a calcareous soil in Syria. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 52:55 – 60
- Pilbeam, C.J., Wood, M. and Mugane, P.G. 1995. Nitrogen use in maize-grain legume cropping systems in semi-arid Kenya. *Biology and Fertility of Soils* 20:57 – 62.
- Prasertsak, P., Freney, J.K., Denmead, O.T., Saffigna, P.G., Prove, B.G. and Reghenzani, J.R. 2002. Effect of fertilizer placement on nitrogen loss from sugarcane in tropical

- Queensland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 62:229 – 239.
- Rao A.C. S., Smith J.L., Papendick R. I. and Parr J. F. 1991. Influence of added nitrogen interactions in estimating recovery efficiency of labeled nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* 55:1616 – 1621.
- Recous, S., Loiseau, P., Machet, J. M. et Mary, B. 1997. Transformation et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In : Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, G. Lemaire & B. Nicolardot (Eds), Les colloques de l'INRA n° 83, 19 – 20 Nov. 1996, Reims, France. pp. 105 - 120
- Rosenani, A.B., Mubarak, A.R. and Zauyah, S. 1999. Recycling of crop residues for sustainable crop production in a maize – groundnut rotation system. In: The use of isotope techniques in studies on the management of organic matter and nutrient turnover for increased sustainable agricultural production and environmental preservation. Report of the third research co-ordination meeting of FAO/AIEA co-ordinated research project. 6 – 10 September, Rabat, Morocco.
- Sauvage, C. 1963. Etages bioclimatiques, Atlas du Maroc, Comité National de Géographie du Maroc, Rabat.
- Sheiner, J.D., Gutiérrez-boem, E.H. and Lavado, R.S. 2002. Sunflower nitrogen requirement and N fertilizer recovery in Westene Pampas, Argentina. *European Journal of Agronomy* 17:72 – 79.
- Schindler F.V. and Knighton R.E. 1999. Fate of Fertilizer Nitrogen Applied to Corn as estimated by the isotopic and Difference Methods. *Soil Science Society of America Journal* 63:1734 – 1740.
- Strong, W. M. 1995. Nitrogen fertilization of Upland crops. In: *Nitrogen fertilization in the environment*. Bacon, P. E. (Ed.), pp. 129 – 169. Marcel Dekker, New York.
- Takahashi, S., Uenosono, S., and Ono S. 2003. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions. *Plant and soil* 251:291 – 301.
- Theocharopoulos, S.P. Karayianni, M. Gatzogiani, P. Afentaki, A. and Aggelides, S. 1993. Nitrogen leaching from soils in the Kopais area of Greece. *Soil Use and Management* 9: 76 – 84
- Torbert H.A., Mulvaney R.L., Vanden Heuvel R.M. and Hoelt R.G. 1992. Soil type and moisture regime effects on fertilizer efficiency calculation methods in a nitrogen-15 study. *Agronomy Journal* 84:66 – 70.
- Tran, T. S. and Tremblay, G. 2000. recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer by bread wheat different N rates and application times. *Canadian Journal of Soil Science* 80:533 – 539.
- Tran, T. S., Giroux, M. et cescas, M.P. 1996. Utilisation de l'engrais azoté marqué au ¹⁵N par le maïs selon les modes d'application et les doses d'azote. *Canadian Journal of Soil Science* 77: 9 – 19.
- Zapata, F. 1990. Isotope techniques in soil fertility and Plant nutrition studies. In: Use of Nuclear techniques in studies of soil-plant relationships. Training course series N°2. pp. 61-127.