

African Crop Science Journal by African Crop Science Society is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 Uganda License. Based on a work at [www.ajol.info/](http://www.ajol.info/) and [www.bioline.org.br/cs](http://www.bioline.org.br/cs)  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/acsj.v25i4.6>



## PERFORMANCES D'UNE NOUVELLE APPROCHE DANS L'ESTIMATION AU CHAMP DE L'UTILISATION DE L'AZOTE DES RÉSIDUS DE RÉCOLTE PAR LES CULTURES

N. EL ALAMI et M. ISMAILI

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

**Auteur correspondant:** [nabalami@yahoo.fr](mailto:nabalami@yahoo.fr)

(Received 27 September, 2016; accepted 12 October, 2017)

### RESUME

La technique isotopique indirecte, basée sur le principe de dilution du marquage isotopique par l'azote issu de la minéralisation des résidus organiques non enrichies de  $^{15}\text{N}$ , a l'avantage d'être plus simple et moins onéreuse que la technique directe (par marquage des résidus). Elle possède cependant des limitations, dues à l'organisation temporaire d'une quantité de l'azote du traceur  $^{15}\text{N}$ , en présence des résidus organiques et qui provoque une dilution du marquage qui n'est pas en relation avec la minéralisation des résidus appliqués, ce qui amène à une surestimation de l'utilisation de l'azote des résidus par la plante. A fin de parer à ces erreurs liées à la substitution des pools de N, une approche modifiée de cette technique a été suggérée. Elle consiste à marquer le sol par  $^{15}\text{N}$  et le laisser se stabiliser, durant plusieurs mois, avant d'appliquer les résidus non marqués. Par ce pré-marquage du sol, l'azote minéral natif du sol et l'azote organisé par les microorganismes ont sensiblement un enrichissement similaire en  $^{15}\text{N}$ . Une expérience a été conduite au champ a fin de tester la fiabilité de nouvelle approche à la technique de dilution dans l'estimation de l'azote des résidus de tournesol (*Helianthus annuus* L. var. Viki) et de la comparer à la technique directe. Le sol a été pré-marqué avec  $^{15}\text{N}$  en appliquant un engrais enrichi de  $^{15}\text{N}$  à la culture du tournesol. A la récolte, nous avons utilisé une méthode de marquage croisé, dans laquelle les résidus de récolte de tournesol marqués par  $^{15}\text{N}$  sont appliqués à un sol non marqué (technique directe) et des résidus de récolte de tournesol non marqués sont appliqués à un sol préalablement marqué par  $^{15}\text{N}$  (technique indirecte, nouvelle approche). Des témoins, sans résidus, à sol prémarqué et à sol non marqués, sont également réalisés. Toutes les parcelles ont été semées avec du blé (*Triticum aestivum* L. var. merchouch) et du tournesol (*Helianthus annuus* L. var. Viki), en succession. Les pourcentages d'azote provenant des résidus de tournesol (% Ndf) dans les cultures du blé et de tournesol ont été respectivement 6,92 % et 3,62 %, estimés par la méthode directe et 7,9 %, 4,24 %, estimé par la méthode indirecte. Les résultats n'ont montré aucune différence significative entre les deux techniques, ce qui suggère que la nouvelle technique par pré-marquage du sol est aussi fiable que la technique directe dans l'estimation de l'utilisation de l'azote des résidus de récolte par les cultures. Elle a en plus l'avantage d'être moins onéreuse et d'être plus simple d'utilisation pour une large gamme de résidus organiques même les plus complexes.

**Mots Clés:**  $^{15}\text{N}$ , %Ndf, résidus de cultures, dilution isotopique

### ABSTRACT

The indirect technique based on the principle of dilution of the isotopic labeling by nitrogen from residue mineralisation has the advantage of being simpler and less expensive than the direct technique (by labelling residues with  $^{15}\text{N}$ ). However, it has limitations due to the temporary organisation of an amount of nitrogen of the  $^{15}\text{N}$  tracer in the presence of the organic residues and which causes a dilution of the isotopic labeling which is not

related to the mineralisation of the residues applied, which leads to an over estimation of the nitrogen-residues use by the plant. In order to minimise errors related to N pools substitution, a modified approach to this technique was suggested. It consists of labeling the soil with  $^{15}\text{N}$  and allowing it to stabilise for several months before applying the unlabeled residues. By this soil pre-labeling, the mineral nitrogen native to the soil and the nitrogen organised by the microorganisms have substantially a similar enrichment in  $^{15}\text{N}$ . A field experiment was conducted to test the new approach for estimating crop N uptake from sunflower residues. The soil was pre-labeled with  $^{15}\text{N}$  by applying  $^{15}\text{N}$ -fertiliser to sunflower crop (*Helianthus annuus* L. var. Viki).  $^{14}\text{N}$  plots which received unlabelled fertiliser were also set up. At harvest,  $^{15}\text{N}$ -labelled residues were added to the unlabelled soils (direct technique) and unlabelled residues were added to the  $^{15}\text{N}$ -labelled soils (indirect technique). Control plots without residues were also established. All plots were sown with wheat (*Triticum aestivum* L. var. merchouch) – sunflower (*Helianthus annuus* L. var. Viki) cropping sequence. The objective of this study is to test in the field the new approach to the dilution technique and to compare it with the direct technique. If the estimates of crop N uptake from organic residues, obtained by the two techniques are similar, this will strongly argue for the validity of the new approach tested. In the cropping sequence, the first and second crop derived respectively 6,92 % and 3,62 % from crop residues estimated by the direct method, 7,9 % and 4,24 % estimated by the indirect method. The results showed no significant difference between the two techniques, which suggests that the soil pre-labeling new technique compares well with the direct technique. It also has the advantage of being less expensive and easier to use for a wide range of organic residues, even the most complex ones.

**Key Words:**  $^{15}\text{N}$ , %Ndf, crop residues, isotopic dilution

## INTRODUCTION

La gestion des matériaux organiques, comme entre autres les résidus de récolte des cultures, a récemment pris de l'importance avec la volonté actuelle de mise en place d'une agriculture durable. Ces amendements constituent une source potentielle de nutriments (notamment l'azote) pour les cultures (Xavier *et al.*, 2013). et améliorent, sur le moyen terme, les qualités physico-chimiques et biologiques du sol (Ghosh *et al.*, 2012 ; Zavattaro *et al.*, 2012). Pour une meilleure gestion des résidus organiques comme source d'azote pour les cultures, il paraît donc essentiel de pouvoir évaluer la part de l'azote (N) des résidus prélevée par ces cultures.

Une des méthodes les plus couramment utilisée est la méthode isotopique dite directe qui consiste à marquer les matériaux organiques par l' $^{15}\text{N}$  et de les appliquer au sol, il s'agit ensuite de suivre, grâce au traceur, le devenir de l'N dans les différents compartiments du système plante – sol. Cette technique permet de mesurer directement et d'une manière simple et fiable la quantité d'N des résidus prélevée par la culture, celle restée dans le sol et également celle perdue hors du

système plante – sol. Par ce principe, elle permet aussi d'étudier l'effet à long terme (durant plusieurs années) d'une application unique des résidus organiques (Merckx *et al.*, 1997 ; Lu *et al.*, 2013). Son application reste cependant limitée, principalement à cause du coût élevé généré par les expérimentations conduites au champ. Ces dernières exigent l'utilisation de grandes quantités de  $^{15}\text{N}$  (élément coûteux) pour marquer les résidus organiques (Hood *et al.*, 2000 ; IAEA, 2001). Il n'est pas sans noter également, la difficulté de réussir un marquage uniforme des résidus (Hood *et al.*, 1999), et aussi la difficulté de marquer certains résidus organiques complexes (fumiers d'origine animale, feuilles d'arbres, boues d'épuration ou autres) (Stockdale et Rees, 1995 ; Watkins et Barraclough, 1996 ; Merckx *et al.*, 1997 ; Hood *et al.*, 2000). Bien qu'il soit possible de marquer des fumiers en alimentant les animaux par du matériel végétal préalablement marqué par l' $^{15}\text{N}$  (Sørensen et Thomsen, 2005; Berntsen *et al.*, 2007, Martínez-Alcántara *et al.*, 2016), l'opération reste complexe et coûteuse (IAEA, 2001).

La recherche d'une nouvelle alternative pouvant parer à ces difficultés s'imposait amplement. Dans cette optique, une technique

utilisant le principe de la dilution isotopique, initialement utilisée pour l'estimation de la fixation biologique de  $N_2$  atmosphérique (Witty et Ritz, 1984), a été proposée (Kumarasinghe et Eskew, 1993). Elle repose sur l'utilisation de deux traitements, à savoir un traitement où le traceur  $^{15}N$  et les résidus non marqués sont appliqués simultanément et un autre traitement, dit témoin, où le traceur est appliqué seul au sol. Dans cette technique, il est supposé que le rapport  $^{15}N$  du traceur /  $^{14}N$  du sol dans la plante est le même pour les deux traitements (Hood *et al.*, 1999). L'azote provenant de la minéralisation des résidus, cause donc une dilution du marquage isotopique dans le traitement avec incorporation des résidus par rapport au témoin sans résidus. Le recouvrement de l'azote des résidus dans les plantes est donc déduit à partir de la différence dans l'excès en  $^{15}N$  entre le traitement et le témoin.

Cette technique présente également des limitations dues aux problèmes liés au phénomène de substitution des pools d'azote dans le sol (Jenkinson *et al.*, 1985 ; Hart *et al.*, 1986; Hood *et al.*, 1999). En effet, l'apport des résidus provoque généralement une organisation temporaire, d'une quantité de l'azote minéral, aussi bien du sol que de l'engrais enrichi en  $^{15}N$ , par les microorganismes du sol (Nicolardot et Recous, 2001) et dont l'amplitude dépend de la composition des résidus ajoutés et des conditions environnementales (Henriksen et Breland, 1999 ; Nicolardot et Recous, 2001). L'azote-15 organisé est aussitôt remplacé par de l'azote-14 natif du sol. Il en résulte ainsi une dilution du marquage qui n'est pas en relation avec la minéralisation des résidus appliqués, pouvant entraîner une surestimation de l'utilisation de l'azote des résidus par la plante (Hood *et al.*, 1999).

Dans le but de minimiser ces erreurs liées à la substitution des pools de N, une approche modifiée de la technique de dilution a été suggérée. Elle consiste à marquer le sol par  $^{15}N$  et le laisser se stabiliser durant une période

d'au moins six mois (IAEA, 2001), avant d'appliquer les résidus.

Par ce pré-marquage du sol, l'azote minéral natif du sol et l'azote libéré par minéralisation sont supposés avoir un enrichissement similaire en  $^{15}N$  (Merckx *et al.*, 1997). Il en découle ainsi que lorsque l' $^{15}N$  du traceur est organisé par les micro-organismes du sol, il est substitué par l'azote du sol à enrichissement similaire en  $^{15}N$  anticipant ainsi les problèmes dus à la substitution des pools d'azote (Merckx *et al.*, 1997).

Cette nouvelle approche a été testée sur différents types de résidus (soja, luzerne, haricot et maïs) et différents types de sols, par Hood *et al.* (2000), dans des expérimentations conduites sous des conditions contrôlées (en pots, sous serre...). Les pourcentages de l'azote provenant des résidus dans la plante du ray-grass, estimés par cette technique, étaient similaires à ceux estimés par la technique directe. Les auteurs ont donc conclu à l'utilité et la fiabilité de la nouvelle approche.

Nous nous proposons dans notre étude une méthode pour appliquer au champ cette nouvelle approche à la technique de dilution, dans laquelle le sol des parcelles est marqué au préalable par les racines (marqués à l'aide du  $^{15}N$ ) de la culture précédente ayant reçu l'engrais azoté enrichi en  $^{15}N$ . Ces parcelles sont utilisées à la saison suivante pour tester cette nouvelle approche indirecte en leur appliquant des résidus non marqués. Les résidus de récolte de la culture précédente, marqués au  $^{15}N$ , sont utilisés pour comparer à la technique directe : ils sont appliqués dans des parcelles à sol non marqué.

Cette méthode a été décrite pour la première fois par Hood (2001). Elle a été testée ensuite par (EL Alami et Ismaili, 2008). Dans ces deux études, les chercheurs n'ont pas pu trouver de différences significatives entre la technique indirecte conventionnelle et la nouvelle approche dans l'estimation au champ de l'utilisation de l'azote des résidus de récolte par les cultures.

L'objectif de cette étude est de tester au champs la fiabilité de la nouvelle approche à la technique de dilution isotopique dans l'estimation de la fourniture d'azote par les résidus de tournesol à deux cultures en succession (le blé et le tournesol). en la comparant à la technique de base (la technique directe).

### MATERIELS ET METHODES

L'étude a été 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. Pendant l'étude, la pluviométrie totale annuelle, a été de 541 et 558 mm la première et la deuxième campagne, respectivement (station météorologique de l'Ecole Nationale de l'Agriculture de Meknès).

Durant les deux années d'expérimentation, la température mensuelle moyenne a varié de 9,5°C à 26,1°C, Le sol de la parcelle d'expérimentation est de type iso-humique calci-magnésique carbonaté, de texture argilo-limoneuse, avec un pH de 8,3 (sol / eau = 1/2) et autour de 3 % de matière organique.

Un mois avant l'installation des essais, une fertilisation de fond (85 kg de sulfate de potassium ha<sup>-1</sup> et 126 kg de superphosphate triple ha<sup>-1</sup>) a été appliquée à la volée sur le sol de l'essai, suivie d'un labour profond à la charrue à soc et trois jours avant le semis du tournesol, le lit de semis a été préparé par deux passages croisés au cover-crop.

A la première saison, les résidus aériens marqués et non marqués de tournesol sont produits sur seize parcelles de 16 m<sup>2</sup> chacune, l'espace entre les parcelles était de 1m. Ces parcelles ont toutes été semées en tournesol (*Helianthus annuus* L. var. Viki) avec une densité de 75 000 pieds ha<sup>-1</sup>. Sur huit parcelles (parcelles marquées), le sulfate d'ammonium (<sup>15</sup>NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> enrichi en <sup>15</sup>N (enrichissement en atomes de <sup>15</sup>N = 4,97 %) est appliqué en bande

à la dose totale de 80 kg N ha<sup>-1</sup>, fractionné en deux apports (50 % au semis - 50 % au stade deux à quatre feuilles). L'engrais dissous dans l'eau est appliqué uniformément afin d'assurer une distribution homogène de l'azote dans les parcelles d'une part et de permettre un accès équitable des plantes à l'azote, d'autre part. L'engrais marqué est appliqué sur toute la parcelle à l'exception d'une bordure de 20 cm.

Sur les huit autres parcelles (parcelles non marquées), la même quantité d'azote est appliquée mais sous forme de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ordinaire, non enrichi en <sup>15</sup>N. Trois irrigations par aspersion, de 60 mm chacune, ont été pratiquées durant le cycle végétal de la culture (au semis et après chaque apport d'azote). Le tournesol est récolté à sa maturité en juillet 1997. Les résidus aériens de tournesol (tiges + feuilles + capitules vides) des parcelles marquées et non marquées sont découpés manuellement en petits fragments de 5 à 7 cm de long, avant d'être enfouis dans le sol, en lits de 15 à 20 cm de profondeur. Ces résidus sont utilisés à la seconde saison pour évaluer les deux techniques directe et indirecte en appliquant : les résidus de tournesol marqués à l'<sup>15</sup>N au sol non marqué (approche directe) et les résidus de tournesol non marqué au sol marqué à l'<sup>15</sup>N (approche indirecte). C'est la technique de marquage croisé.

Le dispositif expérimental consiste en quatre traitements distribués de façon aléatoire dans des blocs et répétés quatre fois (Fig. 1): (i) (sol<sup>o</sup> + Rés.\*) où les résidus marqués, du tournesol fertilisé au préalable à l'engrais enrichi en <sup>15</sup>N, sont enfouis dans le sol non marqué des parcelles ayant été fertilisées à l'engrais ordinaire. 73,07 kg N ha<sup>-1</sup> de résidus à 0,69 % de <sup>15</sup>N a. e. (excès atomique) sont appliqués; (ii) (sol\* + Rés.<sup>o</sup>) où les résidus non marqués du tournesol produits sur les parcelles ayant reçu le fertilisant non enrichi à l'<sup>15</sup>N, sont appliqués aux parcelles à sol prémarqué à l'<sup>15</sup>N à la dose de 70,31 N ha<sup>-1</sup>; (iii) Un témoin sans application de résidus à sol marqué (sol\* - Rés.), et (iv) Un témoin

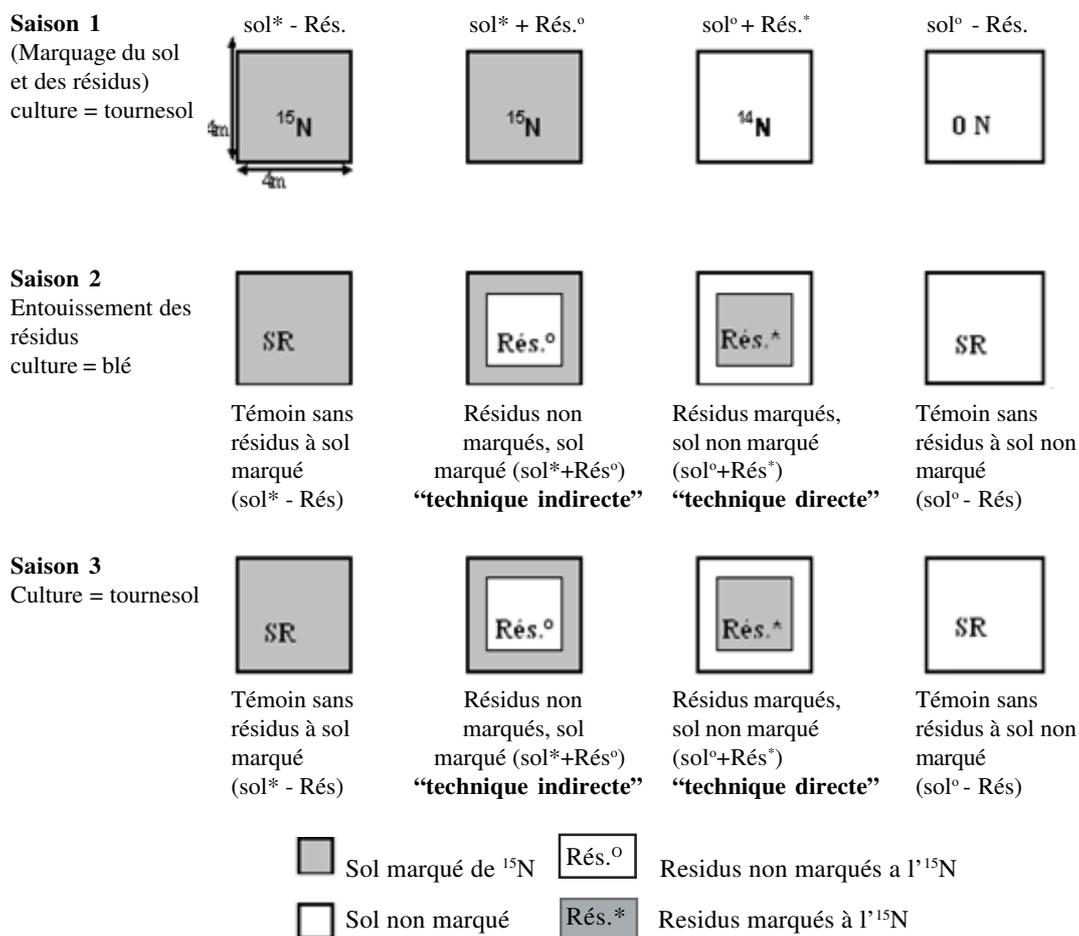


Figure 1. Dispositif expérimental de l'essai.

sans application de résidus à sol non marqué (sol° - Rés.).

Sur ces parcelles, le blé tendre (*Triticum aestivum* L. var Merchouch) et le tournesol (*Helianthus annuus* L. var. Viki) sont semés en succession. Le blé est semé en Août 1997 et récolté en Décembre 1997 et le tournesol, est semé en Février 1998 puis récolté en Juillet 1998. Les deux cultures ont reçu respectivement 63 et 30 kg N ha<sup>-1</sup> d'engrais non enrichi en  $^{15}\text{N}$  et le devenir de l'azote des résidus appliqués est étudié dans les deux saisons qui suivent son application.

A maturité de chaque culture, des échantillons du matériel végétal (graines, racines et résidus aériens) sont prélevés,

séchés à l'étuve à une température de 70 °C jusqu'au poids stable, pesés, broyés puis tamisés à 0,5 mm de diamètre. Des échantillons du sol sont aussi prélevés à des profondeurs de 0 – 30 cm, 30 – 60 cm et 60 – 90 cm (quatre prélèvements pour chaque parcelle). Ils sont broyés puis tamisés à 0.5 mm et gardés au froid, à 4°C jusqu'à l'analyse.

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  $^{15}\text{N}$ . 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  $^{15}\text{N}$  du matériel végétal a été déterminée par spectrophotométrie de masse combinée à un analyseur automatique d'azote et à un analyseur du rapport isotopique stable » (IAEA, 1990).

Utilisant la technique isotopique directe, la contribution de l'azote des résidus à l'alimentation de la plante est estimée en pourcent de l'azote de la plante provenant de la minéralisation des résidus (% Ndf) selon l'Équation 1 (Hauck et Bremner, 1976) :

% Ndf (% de N de la plante) =

$$\frac{\% \text{ }^{15}\text{N a.e. de plante (sol}^\circ + \text{Rés.*)}}{\% \text{ }^{15}\text{N a. e. des résidus marqués}} \times 100$$

..... Équation 1

Utilisant la technique isotopique de dilution, le % Ndf est calculé selon l'Équation 2 (Mc Auliffe *et al.*, 1958) :

% Ndf (% N de la palnte) =

$$\frac{[ 1 - \% \text{ }^{15}\text{N a.e. de plante (sol}^* + \text{Rés.}^\circ) ]}{\% \text{ }^{15}\text{N a. e. de plante (sol}^* - \text{Rés.)}} \times 100$$

..... Équation 2

La quantité de l'azote dérivé par la plante à partir des résidus (Ndf), exprimé en (kg N ha<sup>-1</sup>), est calculée selon Hauck et Bremner (1976) (Équation 3) :

Ndf (kg N ha<sup>-1</sup>) =

$$\frac{\% \text{ Ndf} \times \text{NT de plante (kg ha}^{-1}\text{)}}{100}$$

..... Équation 3

L'efficacité d'utilisation de l'azote des résidus par la plante est estimée par le calcul du coefficient d'utilisation de l'azote des résidus par la plante (CU), exprimé en pourcent de l'azote des résidus selon l'Équation 4 :

CU (% de N des résidus) =

$$\frac{\text{Ndf (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{N des résidus appliqués}} \times 100$$

..... Équation 4

Toutes les données recueillies ont été statistiquement analysés par le logiciel SPSS (SPSS pour Windows édition 10,0 Chicago, 1999). Pour la comparaison des moyennes, le test d'analyse de la variance (ANOVA) a été utilisé avec un seuil de probabilité de 5%.

## RESULTATS

A la première saison, les rendements moyens en matière sèche totale (MST) et en azote total (NT) du tournesol ont été respectivement de 12,4 3 t ha<sup>-1</sup> et de 134,9 kg N ha<sup>-1</sup> au niveau des parcelles fertilisées avec l'engrais enrichi en  $^{15}\text{N}$  et de 12,01 t ha<sup>-1</sup> et 136,5 kg ha<sup>-1</sup> au niveau des parcelles fertilisées avec l'engrais normal. Le tournesol avait récupéré en moyenne 24 à 25 % de l'azote de l'engrais qui lui a été appliqué. A la récolte, 50 % de azote était encore présent dans le sol (jusqu'à 90 cm de profondeur). L'enfouissement au sol des résidus de récolte du tournesol de la première saison n'a pas amélioré la production et l'alimentation azotée du blé et du tournesol des deux saisons subséquentes (Tableau 1). Aucune différence significative ( $P > 0,05$ ) n'a été notée entre les deux traitements où les résidus de tournesol ont été enfouis (sol\* + Rés.<sup>o</sup> et sol<sup>o</sup> + Rés.\*) et leur témoins respectifs sans résidus (sol\* - Rés. Et sol<sup>o</sup> - Rés.).

Par ailleurs, l'utilisation de l'azote des résidus de récolte de tournesol par la culture du blé a constitué près 7 % du prélèvement en azote total de la plante (% Ndf = 6,92 %) (Tableau 2). La culture du blé a donc dérivé la plus grande part de son azote (93 %) à partir du sol et de l'azote de l'engrais non marqué appliqué à la culture.

TABLEAU 1. Effet de l'enfouissement des résidus de tournesol sur les rendements en matière sèche et les prélèvements en azote total des cultures du blé (saison 2) et de tournesol (saison 3)

Cultures	Traitement	Rendement en matière sèche (t ha <sup>-1</sup> )				Prélèvement en azote total (kg ha <sup>-1</sup> )			
		Résidus	Racines	Graines	Total	Résidus	Racines	Graines	Total
Blé (saison 2)	(sol <sup>*</sup> +Rés <sup>o</sup> )	6,48a <sup>§</sup>	0,81b (0,1)	2,54c (0,6)	9,83e (1,0)	69,62a (8,2)	5,96b (0,8)	80,50c (4,1)	156,08e (12,0)
	(sol <sup>*</sup> - Rés)	6,73a	0,80b (0,0)	2,84c (0,3)	10,36e (0,7)	75,45a (6,9)	6,50b (1,4)	84,24c (9,4)	166,18e (11,2)
	(sol <sup>o</sup> +Rés <sup>*</sup> )	6,00a	0,83b (0,1)	2,77c (0,2)	9,60e (0,6)	70,83a (0,9)	6,11b (0,4)	85,44c (8,7)	162,37e (7,6)
	(sol <sup>o</sup> - Rés)	6,36ad	0,78b (0,0)	2,91c (0,4)	10,05e (0,5)	74,86a (2,0)	6,56b (1,3)	83,90c (9,5)	165,32e (9,9)
Tournesol (saison 3)	(sol <sup>*</sup> +Rés <sup>o</sup> )	7,26a (1,2)	0,78b (0,0)	1,03c (0,2)	9,07e (1,2)	52,95a (12,5)	3,42b (0,9)	51,79c (8,9)	108,16d (29,4)
	(sol <sup>*</sup> - Rés)	7,21a (0,9)	0,76b (0,0)	1,33d (0,2)	9,30e (0,8)	51,66a (6,3)	2,61b (0,4)	53,90c (4,5)	108,18d (17,1)
	(sol <sup>o</sup> +Rés <sup>*</sup> )	7,03a (0,9)	0,76b (0,0)	0,99c (0,1)	9,38e (0,8)	53,67a (5,9)	3,20b (0,3)	49,41c (1,2)	106,28d (4,4)
	(sol <sup>o</sup> - Rés)	7,17a (0,7)	0,73b (0,0)	1,28d (0,1)	9,17e (0,7)	56,18a (8,3)	2,83b (0,3)	53,07c (12,8)	112,09d (10,9)

§ : Pour chaque culture, les § : Valeurs suivies de lettres différentes sont significativement (P<0,05) différentes. §§ : Les valeurs entre parenthèses correspondent aux erreurs standards

La contribution de l'azote des résidus marqués à l'alimentation azotée de la plante du tournesol, à la saison suivante, a été encore plus faible de l'ordre de 3,84 kg N ha<sup>-1</sup>, soit 3,62 % du prélèvement total de la culture du tournesol (Tableau 2).

La distribution de l'azote des résidus dans les différentes parties de la plante montre que ce sont les graines et les résidus aériens qui ont mobilisé la plus grande quantité de l'azote des résidus absorbé par la plante du blé, soit 5,0 et 5,9 kg N ha<sup>-1</sup> respectivement, contre 0,3 Kg N ha<sup>-1</sup> seulement mobilisés par les racines (Tableau 2). Une tendance similaire est observée pour la culture du tournesol subséquente avec 1,5 et 2,1 kg N ha<sup>-1</sup> dans les graines et les résidus aériens contre 0,25 kg N ha<sup>-1</sup> dans les racines.

Le coefficient d'utilisation de l'azote des résidus de tournesol par la culture du blé (CU) tel qu'il a été estimé par la technique directe était de 15,34 % (Tableau 2). L'utilisation de l'azote des résidus résiduel par la culture suivante du tournesol en azote était significativement plus faible, de l'ordre de 5,29% seulement (Tableau 2).

L'analyse du sol à la récolte du blé a montré que 57,58 kg N ha<sup>-1</sup>, soit 79,11 % de l'azote des résidus appliqués étaient présents dans le sol jusqu'à 90 cm de profondeur (Fig. 2). Une grande partie de cet azote résiduel (72 %) est restée dans la zone superficielle (0 – 30 cm) du profil (41,28 kg N ha<sup>-1</sup>). (16,01 kg N ha<sup>-1</sup>) sont restés dans la zone 30 – 60 cm. Finalement une quantité négligeable, de l'ordre de 0,29 kg N ha<sup>-1</sup>, est par contre retrouvée dans la zone la plus profonde du profil (60 – 90 cm) (Fig. 2).

A la récolte du tournesol (troisième saison), 49,38 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote des résidus étaient encore présents dans le sol (0 – 90 cm) (Fig. 2). Notons que par rapport à la saison précédente, une diminution significative de 10 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote résiduel resté dans la zone 0 – 60 cm du sol a été notée. Dans la zone la plus profonde (60 – 90 cm), l'azote résiduel a connu par contre, une augmentation significative de 1,76 kg N ha<sup>-1</sup> (Fig. 2).

TABLEAU 2. Estimation par la technique directe de l'utilisation de l'azote des résidus par les différentes parties des plantes du blé et du tournesol en succession

Culture	Partie de la plante	N des résidus marqués		CU
		kg ha <sup>-1</sup> §	%§§	
Blé (saison 2)	Résidus	5,89 (3,2) <sup>§§§</sup>	8,31 (4,4)	7,95 (4,1)
	Racines	0,33 (0,2)	5,54 (3,2)	0,45 (0,2)
	Graines	5,03 (1,2)	5,99 (1,8)	6,94 (1,9)
	Plante entière	11,25 (4,2)	6,92 (2,5)	15,34 (4,8)
tournesol (saison 3)	Résidus	2,11 (1,0)	3,95 (1,9)	2,9 (1,4)
	Racines	0,25 (0,1)	7,82 (2,0)	0,34 (0,1)
	Graines	1,49 (0,1)	3,01 (0,2)	2,05 (0,3)
	Plante entière	3,84 (1,1)	3,62 (1,0)	5,29 (1,4)

§ : Quantité d'azote prélevé par la plante à partir des résidus estimée en kg N ha<sup>-1</sup> (Ndfr). §§ : Le taux d'azote issu des résidus absorbé, sur le prélèvement total d'azote de la plante (% Ndfr)

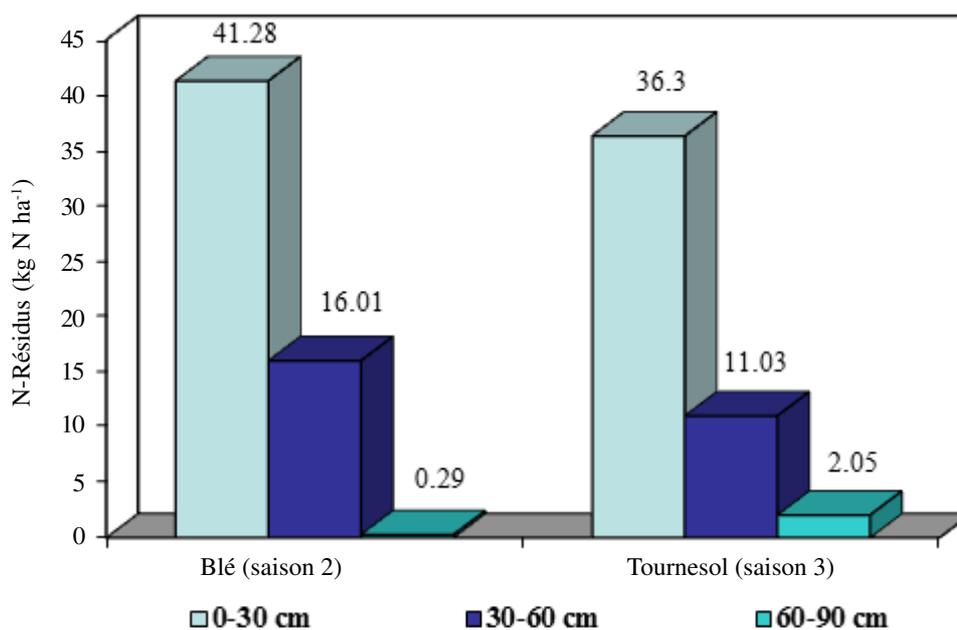


Figure 2. Azote des résidus résiduel dans le sol à la récolte des cultures, jusqu'à 0,9 m de profondeur.

Dans nos investigations, nous avons établi le bilan de l'azote des résidus marqués par <sup>15</sup>N après deux saisons de cultures. Les résultats tels qu'ils sont présentés sur la Figure 3 montrent que les deux cultures successives ont récupéré ensemble 15.1 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote de résidus (20.6 % de l'apport). A la fin du deuxième cycle végétal, 49.4 kg N ha<sup>-1</sup>, étaient

encore présentes dans le sol jusqu'à 0,9 m de profondeur, soit 67.6 % de N des résidus apporté.

Les valeurs de Ndfr et du % Ndfr ont été estimées par les deux techniques directe et indirecte et les résultats sont présentés sur la Figure 4. La proportion de l'azote absorbé, issue des résidus du tournesol, sur le

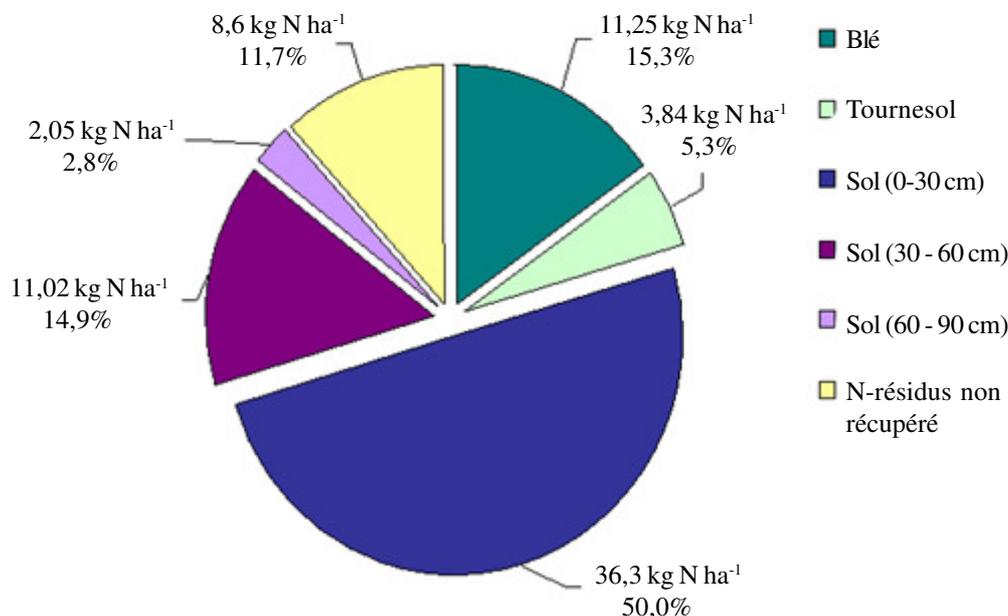


Figure 3. Bilan de l'azote des résidus de tournesol après deux saisons de cultures (en kg N ha<sup>-1</sup> et en % de N-résidu appliqué).

prélèvement total d'N de la culture du blé (% Ndf<sub>r</sub>) étaient de 6,92 % et 7,9 % de moyenne estimée respectivement par la technique directe et indirecte (Fig. 4). Les quantités d'azote des résidus absorbées par la plante du blé (Ndf<sub>r</sub>) étaient respectivement de 11,25 et 12,23 kg N ha<sup>-1</sup> (Fig. 4). Le tournesol suivant a mobilisé 3,84 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote résiduel des résidus appliqués au blé (estimation directe) et 4,51 kg ha<sup>-1</sup> (estimation indirecte par la technique de dilution modifiée) (Fig. 4), ces valeurs correspondant respectivement à 3,62 et 4,24 % du prélèvement total de la culture.

Aucune différence significative ( $P > 0,05$ ) n'a été notée entre les valeurs du Ndf<sub>r</sub> et du % Ndf<sub>r</sub> estimées par les deux techniques (directe et indirecte).

## DISCUSSION

Le tournesol de la première saison avait récupéré en moyenne presque le un quart de l'azote de l'engrais qui lui a été appliqué. Les valeurs de % Ndf<sub>r</sub> obtenues (de 24% à 25 %) sont nettement plus faibles que la valeur

moyenne de 51 % rapportée par Scheiner *et al.* (2002) et légèrement plus faible que la valeur de 33 % rapportée par Ismaili *et al.*, (2003). Elles sont par contre, similaires aux valeurs de 24 à 25 % rapportées par El Alami et Ismaili en (2005) et en (2007) respectivement et qui ont travaillé dans des conditions similaires que les notre (même type de sol, même variété de tournesol, et des doses similaires de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ).

Cette faible utilisation de l'azote de l'engrais par le tournesol peut être attribuée en grande partie à un fort degré d'organisation de l'azote de l'engrais par les micro-organismes du sol. Mais, elle peut s'expliquer aussi par la perte d'une quantité de l'azote de l'engrais par dénitrification, volatilsation ou lessivage. Plusieurs conditions favorisant ces mécanismes des pertes étaient, en effet, réunies dans notre expérimentation : (i) le pH > 8 du sol d'expérimentation qui favorise la conversion rapide de l'ammonium en nitrate et rend l'azote plus vulnérable aux pertes par lessivage ou par dénitrification au-delà de la zone racinaire. (Blackmer *et al.*, 2000) ; (ii) la

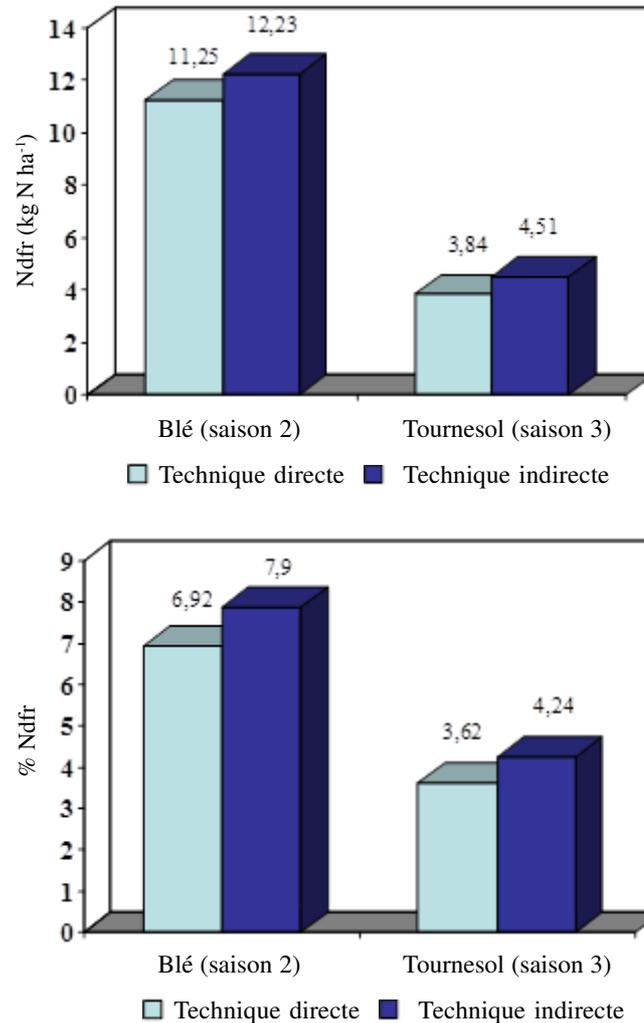


Figure 4. Comparaison de la technique directe et indirecte dans l'estimation de l'azote dérivé des résidus de tournesol (Ndfr et % Ndfr), par les cultures du blé et du tournesol en succession.

pratique de l'irrigation et les précipitations survenues au moment de l'application de l'engrais ; (iii) la richesse du sol en calcaire 27 % de  $\text{CaCO}_3$  qui peut être à l'origine de pertes gazeuses de l'ammonium de l'engrais par volatilisation, nitrification et /ou dénitrification (Pilbeam et Hutchison, 1998) ; (iv) la nature ammoniacale de l'engrais ainsi que le mode de son application en solution à la surface du sol peut être aussi à l'origine de pertes gazeuses de l'azote de l'engrais (Pilbeam et Hutchison, 1998 ; Cai et Trambly, 2000; Prasertsak *et al.*, 2002)

A la récolte du tournesol, 50 % de cet azote de l'engrais était encore présent dans le sol (jusqu'à 90 cm de profondeur). La récupération de l'azote de l'engrais par l'ensemble du système (plante + sol à 0,9 m de profondeur) à la récolte du tournesol n'a pas atteint 100 %, L'azote non récupéré (24 à 25 %), est attribué surtout à des pertes par les différents processus précités. Des résultats similaires ont été rapportés par El Alami et Ismaili (2005) pour qui le recouvrement de l'azote de l'engrais dans la plante (le tournesol) et dans le sol (0 - 90 cm) n'a été de 77 %. De

même pour El Alami et Ismaili (2007) qui ont rapporté un taux de recouvrement de l'azote de l'engrais dans la culture de tournesol et dans le sol à 0,9 m de profondeur de 24, 4 % et 50,5 %, respectivement. 25,1 % n'ont pas pu être récupérés. D'autres auteurs ont rapporté des résultats similaires pour d'autres systèmes de cultures ; Ismaili *et al.* (2003) ont rapporté également des faibles taux des recouvrement de l'azote de l'engrais avoisinant 37 % dans deux cultures différentes (le blé et la fève) avec des pertes de l'azote de l'engrais hors du système plante –sol de 41 % pour le blé et de 27 % pour la fève.

Pour Douxchamps *et al.* (2011), le recouvrement de l'azote de l'engrais dans la culture du maïs n'a été que de 31,8 %. Le recouvrement dans le sol, à la récolte de la culture, a été de 50,1 % et 28 % de l'azote de l'engrais n'ont pas pu être récupérés par le système plante – sol.

Par ailleurs, l'enfouissement au sol des résidus de récolte du tournesol de la première saison n'a pas amélioré la production et l'alimentation azotée des cultures blé et du tournesol des deux saisons subséquentes. Dans la littérature, nombreuses études ont montré qu'à court terme, les effets de l'apport des résidus de récolte sur la productivité des cultures sont faibles voire négatifs (Hood *et al.*, 1999). Soon, en 1999 a étudié l'effet de trois modes de gestion de la paille de l'orge (enlevée, enfouie à la charrue ou enfouie superficiellement à la déchaumeuse) sur le rendement grainier et l'absorption de N par la culture de l'orge et n'ont noté aucun effet significatif des résidus sur la productivité de l'orge. Schroeder *et al.* (1998) ont de leur part observé que les rendements de Broccoli ne montrent pas de différence significative entre les traitements avec résidus de Cowpea et sans résidus. Selon Eagle *et al.* (1999), l'effet positif des résidus sur le rendement des cultures ne s'est manifesté qu'à la cinquième année de la rotation: le rendement en grain dans les traitements non fertilisés avec apport de résidus ont atteint le double de ceux obtenus dans les

traitements sans résidus. Pour Yu Wang, (1999), l'application des résidus n'a pas eu d'effet sur la productivité des cultures au cours de la première saison de croissance, mais, dans les trois saisons suivantes, une augmentation graduelle des rendements a été observée. Rahman *et al.* (2002) ont observé que l'apport des résidus du blé n'avait pas d'effet sur les rendements grainiers de la culture du riz subséquente. Mais deux années après, les rendements grainiers des cultures ont été nettement améliorés dans les parcelles avec résidus par rapport à celles sans résidus suggérant un effet à long terme des résidus sur la production des cultures. El Alami et Ismaili (2008) ont appliqué les résidus de tournesol à la première culture de blé d'une succession blé - fève – blé. Leurs résultats n'ont montré aucun effet significatif des résidus sur la productivité et l'alimentation azotée des deux premières cultures. Ils ont par contre noté une amélioration significative de ces facteurs pour la troisième culture de blé.

L'apport des résidus organiques à faible contenu en azote (< 1 %) tel le cas des résidus de tournesol provoque généralement un effet dépressif sur la production et l'alimentation azotée des cultures (Houdouch, 1994). Il a été rapporté dans ce sens que la dégradation des résidus de cultures, à teneur faible en azote, se traduit, dans les semaines qui suivent leur enfouissement, par une organisation nette de l'azote et une diminution de l'azote minéral présent dans le sol (CETIOM, 1999 ; Hartman, 1999 ; Nicolardot et Recous, 2001), ce qui provoque dans certains cas une carence en azote (Baldock, 2005). Hood *et al.* (1999) ont montré que les rendements en matière sèche et en azote total de la culture du maïs étaient significativement plus faibles dans les traitements avec résidus du maïs comparés aux traitements sans résidus.

Dans nos résultats, l'enfouissement des résidus de tournesol n'a pas eu un effet dépressif significatif ( $P > 0.05$ ) sur la production et l'alimentation azotée des cultures subséquentes de blé et tournesol. Ceci est

probablement dû à l'apport de N minéral sous forme d'engrais à ces deux cultures qui a certainement contré l'organisation de l'azote. Des résultats semblables ont été rapportés par Morris et Parrish, (1992) ; par Ismaili *et al.* (2003) et El Alami et Ismaili (2008) dans des essais conduits au champs avec des doses variables de résidus de récolte de tournesol.

Nos résultats sont corroborés par de nombreuses investigations qui ont montré que les effets, à court terme, de l'apport des résidus de récolte sur la productivité des cultures sont souvent faibles et non significatifs (Powlson *et al.*, 1985 ; Soon, 1999 ; Kouyaté *et al.*, 2000 ; Wang, 2013).

L'enfouissement des résidus a provoqué une diminution légère et non significative ( $P > 0,05$ ) des rendements en MST et en NT du blé dans les traitements, sol\* + Rés.° et sol° + Rés.\*, où les résidus de récolte de tournesol ont été enfouis, par rapport à leurs témoins respectifs, sol\* - Rés. et sol° - Rés. Un résultat semblable a été rapporté par Powlson *et al.* (1985) pour les résidus du blé.

L'effet dépressif des résidus de culture sur la production et l'alimentation des cultures a fait l'objet de nombreuses investigations (Hood *et al.*, 1999 ; Zagal *et al.*, 2003). Cet effet serait dû à l'organisation de l'azote minéral par les microorganismes du sol, lors de la dégradation des résidus de cultures surtout ceux à faible contenu en azote et fort rapport C/N (CETIOM, 1999 ; Nicolardot et Recous, 2001 ; Nicolardot *et al.*, 2001 ; Nourbakhsh et Dick, 2005 ; Rodrigues *et al.*, 2006 ; Mohanty *et al.*, 2013).

Dans nos expérimentations, nous pensons que l'apport de N minéral sous forme d'engrais à la culture du blé a probablement contré cette organisation de l'azote minéral du sol. Cette hypothèse est étayée par les travaux de Kumar et Goh (2000) et de Zagal *et al.* (2003). Dans ce sens Zagal *et al.* (2003) ont montré en effet que quand le blé n'est pas fertilisé, les rendements obtenus étaient significativement plus faibles par près de 4 t ha<sup>-1</sup> dans les

traitements avec résidus de maïs comparés aux traitements sans résidus, alors qu'après fertilisation du blé la différence dans les rendements n'était que de 1 t ha<sup>-1</sup>. Lu *et al.* (2013) ont également rapporté que l'apport concomitant des résidus de récolte et de l'engrais entraîne une augmentation significatif des rendements par rapport à l'apport des résidus seuls. Même résultat a été rapporté par Kumar et Goh (2000).

Nos résultats sur l'utilisation de l'azote des résidus par les cultures, obtenus par la technique isotopique directe, ont montré que les résidus de récolte de tournesol n'étaient pas une source importante d'azote pour la culture du blé. L'azote des résidus n'a constitué en effet que près 7 % du prélèvement en azote total de la plante (% N<sub>dfr</sub> = 6,92 %). Cette valeur se situant alors, à l'intérieur de l'intervalle «1 % à 49 % » rapportées par littérature pour différents types de résidus (Hood *et al.*, 1999, 2000 ; Glasener *et al.*, 2002) . La culture du blé a donc dérivé la plus grande part de son azote (93 %) à partir du sol et de l'azote de l'engrais non marqué appliqué à la culture.

La contribution de l'azote des résidus marqués à l'alimentation azotée de la plante du tournesol, à la saison suivante, a été encore plus faible de l'ordre de 3,84 kg N ha<sup>-1</sup>, soit 3,62 % du prélèvement total de la culture du tournesol.

La distribution de l'azote des résidus dans les différentes parties de la plante montre que ce sont les graines et les résidus aériens qui ont mobilisé la plus grande quantité de l'azote des résidus absorbé par la plante du blé. Par contre, une très faible quantité a été mobilisée par les racines. Une tendance similaire est observée pour la culture du tournesol de la saison suivante.

Le coefficient d'utilisation de l'azote des résidus de tournesol par la culture du blé (CU) tel qu'il a été estimé par la technique directe n'était que de 15,34 %. Cette faible valeur d'utilisation l'azote des résidus de tournesol

par la culture du blé témoin d'une minéralisation assez lente des résidus enfouis. Cette valeur est très proche de celle de 16,8 % rapportée par El Alami et Ismaili (2008) pour les résidus de tournesol et celle de 16,2 % rapportée par Ichir et Ismaili (2003) pour les résidus du blé ; et par Lu *et al.* (2013) pour le fumier vert du ray-grass.

L'utilisation de l'azote résiduel des résidus par la culture suivante du tournesol était significativement plus faible, de l'ordre de 5,29 % seulement (Tableau 2). Ceci montre que l'azote des résidus restant dans le sol à la récolte de la culture du blé ne se présentait pas sous une forme disponible pour les plantes. Mais, bien qu'étant faibles, ces taux de recouvrement de l'azote des résidus dans les plantes aux saisons subséquentes témoignent d'une minéralisation lente et plutôt progressive des résidus de tournesol.

Cette diminution des taux de recouvrements en N des résidus au-delà de la saison de leur application a aussi été rapportée par El Alami et Ismaili (2008) pour qui les taux de recouvrement en N des résidus de tournesol dans la plante ont passé de 16,8 % à la première saison à seulement 3,4 % et 2,8 % à la seconde et la troisième saison, respectivement. Lu *et al.* (2013) ont travaillé sur des résidus de ray grass. Les taux de recouvrement obtenus à la première saison de croissance étaient en moyenne de 41,7%. Les proportions correspondantes dans la deuxième, troisième, quatrième, cinquième et sixième saison de croissance ont été respectivement de 22,9%, 10,6%, 7,0%, 5,5% et 4,9%. Au delà de sixième saison les taux étaient inférieurs à 2,7%.

L'analyse du sol à la récolte du blé a montré 79,11 % de l'azote des résidus appliqués étaient présents dans le sol jusqu'à 90 cm de profondeur. La plus grande partie de cet azote résiduel est restée dans la zone superficielle (72 % dans la zone « 0 – 30 cm » du profil et 27,5 % dans la zone « 30 – 60 cm »). Cet azote est théoriquement disponible pour les cultures suivantes.

A la récolte du tournesol, 49,4 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote des résidus étaient encore présents dans le sol (0 – 90 cm). Notons que par rapport à la saison précédente, une diminution significative de 10 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote résiduel resté dans la zone 0 – 60 cm du sol a été notée. Cette diminution peut être expliquée par le fait que cette zone représente une zone d'absorption racinaire et également une zone de pertes de l'azote par dénitrification. Dans la zone la plus profonde (60 – 90 cm), l'azote résiduel a connu par contre, une augmentation significative de 1,76 kg N ha<sup>-1</sup>, suggérant la probabilité de perte d'une certaine quantité de l'azote des résidus par lixiviation.

Nous avons établi le bilan de l'azote des résidus marqués par <sup>15</sup>N après deux saisons de cultures. Les résultats tels qu'ils sont présentés sur la Figure 3 montrent que les deux cultures successives ont récupéré ensemble 15.1 kg N ha<sup>-1</sup> de l'azote de résidus (20.6 % de l'apport). A la fin du deuxième cycle végétal, des quantités substantielles de l'azote des résidus (49.4 kg N ha<sup>-1</sup>), soit 67.6 % de N apporté, étaient encore présentes dans le sol jusqu'à 0,9 m de profondeur. Il s'avère donc qu'après deux cycles végétales, 8.6 kg N ha<sup>-1</sup> (11,7 %) n'ont pu être récupérés (Fig. 2) et sont considérés comme perdus du système plante – sol, probablement par dénitrification et par lessivage. Les grandes quantités de l'azote des résidus restées dans le sol à l'issue de la troisième saison constitueraient une source potentielle d'azote pour les cultures ultérieures par le biais du processus de la minéralisation. Des études menées à plus long terme demeurent cependant nécessaires pour mettre en évidence cet aspect.

Dans notre essai, nous avons développé une procédure de pré-marquage du sol afin de tester, dans des essais conduits au champ, la fiabilité de l'approche à la technique de dilution isotopique proposée par Hood (2001).

Aucune différence significative ( $P > 0,05$ ) n'a été notée entre les valeurs du Ndfr et du % Ndfr estimées par les deux techniques (directe et indirecte) suggérant que la technique

de dilution par pré-marquage du sol permet d'estimer la fourniture de l'azote par les résidus de culture au même titre que la technique directe. Nos résultats vont dans le même sens que ceux obtenus par Hood *et al.* (2000) dans leurs essais en pots et par Hood, R. (2001) et El Alami et Ismaili (2008) dans leurs essais conduits au champ. Ils diffèrent par contre de ceux rapportés par Douxchamps *et al.* (2011) pour qui les valeurs de % N<sub>dfr</sub> étaient surestimées par la technique indirecte par rapport à la technique directe.

Dans nos essais, les valeurs du % N<sub>dfr</sub> estimées par la nouvelle approche à la technique de dilution étaient légèrement, mais pas significativement, supérieures à celles estimées par la technique directe. Cette légère différence peut être expliquée par le fait que les deux traitements à marquage croisé (sol\* + Rés.<sup>o</sup> et sol<sup>o</sup> + Rés.\*) qui, en principe, ne diffèrent que par la position du marquage isotopique qui est le sol pour le traitement sol\* + Rés.<sup>o</sup> et les résidus pour le traitement sol<sup>o</sup> + Rés.\*, présentaient peut être quelques légères différences pour d'autres critères : en plus de la position du marquage. Il est à noter à cet égard dans les expérimentations conduites sous des conditions non contrôlées (aux champs), bien qu'il soit essentiel d'obtenir des traitements similaires en tout, sauf en la position du marquage, il n'est toujours pas facile de s'en tenir à cette condition. Dans notre expérimentation, tous les efforts ont été déployés, et ce, à tous les stades d'expérimentation afin d'assurer des conditions de croissance similaires pour les deux traitements. Cependant il n'est pas exclu que des petites différences notamment celles inhérentes à la qualité des résidus, l'humidité du sol..... etc, par exemple, peuvent toujours être source de différences entre les deux traitements sol\* + Rés.<sup>o</sup> et sol<sup>o</sup> + Rés.\*.

Mis à part cette difficulté nos résultats, pris dans leur globalité, montrent clairement que la nouvelle approche à la technique de dilution estimait le % N<sub>dfr</sub> de manière équivalente que la technique directe.

Nos résultats montrent en plus que cette technique permet, aussi bien que la technique directe, de suivre le devenir de l'azote des résidus au-delà de la saison de leur application. Ceci a également été rapporté par El Alami et Ismaili (2008). Ces auteurs ont pu, grâce à la nouvelle approche modifiée de la technique de dilution, suivre le devenir de l'azote des résidus, appliqués en un seul apport, durant trois saisons successives.

## CONCLUSION

Le but principal de notre étude a été d'évaluer au champ la fiabilité de la nouvelle approche à la technique de dilution (par pré-marquage du sol) dans l'estimation de l'utilisation de l'azote des résidus par les cultures, en comparant les résultats obtenus par cette technique à ceux obtenus par la technique directe (par marquage des résidus). Dans notre essai, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre les deux techniques, et suggérant que la nouvelle approche à la technique indirecte de dilution est aussi fiable que la technique directe dans l'estimation de l'utilisation de l'azote des résidus par les cultures. Elle se caractérise également par l'avantage d'être plus simple et moins onéreuse (ne nécessite pas le marquage des résidus et requiert un enrichissement plus faible de l'engrais en <sup>15</sup>N) que la technique directe et pouvant ainsi être utilisée dans l'évaluation de la fourniture d'<sup>15</sup>N par tous les types de matériaux organiques, même les plus complexes et les plus difficiles à marquer. La nouvelle approche que nous avons testé permet ainsi par ces aspects de surmonter les difficultés dues aux problèmes de substitution des pools d'<sup>15</sup>N, ce qui ne pouvait pas être réalisé par la technique de dilution isotopique conventionnelle. Aussi encourageants que soient nos résultats, il ne va pas sans dire que cette technique doit être testée sur un plus large panel de résidus organiques afin de mieux confirmer son usage et par conséquent son utilité agronomique.

## REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux responsables de l'Agence Internationale de l'énergie Atomique (AIEA) à Vienne et de l'organisation FAO pour le financement de cette étude. Nos remerciements vont également aux responsables des laboratoires de Seibersdorf (Autriche) pour l'analyse de  $^{15}\text{N}$  de nos échantillons.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexander, M. 1977. Mineralization and immobilization of nitrogen. pp.136-247. In: Alexander, M. (Ed.). Introduction to soil microbiology, 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Berntsen, J., Petersen B.M., Sørensen, P. Olesen, J.E. 2007. Simulating residual effects of animal manures using  $^{15}\text{N}$  isotopes. *Plant and Soil* 290 (1): 173–187.
- Bremner, J.M. 1965. Total nitrogen. . In: Black C.A. et al. Ed. *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*. American. Society of Agronomy, Madison, WI, USA. 1148pp.
- Chantigny, M.H., Angers, D.A., Pomar, C. and Morvan, T. 2004. The use of  $^{15}\text{N}$ -enriched feed to label pig excreta for N cycling studies. *Canadian Journal of Soil Science* 84:43-48.
- CETIOM. 1999. Minéralisation de l'azote de la paille de colza. *Rapport d'activité*: 40-41.
- Douxchamps, S., Frossard, E., Bernasconi S.M., Van Der Hoek, R., Schmidt, A., Rao, I.M. and Oberson, A. 2011. Nitrogen recoveries from organic amendments in crop and soil assessed by isotope techniques under tropical field conditions. *Plant and Soil* 341:179-192.
- El Alami, N. et Ismaili, M. 2005. Devenir de l'azote de l'engrais enrichi au  $^{15}\text{N}$  appliqué au tournesol et récupération de l'azote résiduel par trois cultures subséquentes sous deux modes de gestion des résidus de tournesol. *African Crop Science Journal* 13 (4):149-268.
- El Alami, N. and Ismaili, M. 2007. Nitrogen use efficiency and dynamics in a sunflower-wheat-faba bean-wheat rotation with and without use of sunflower residues. *European Journal of Scientific Research* 16(3):367-379.
- El Alami, N. and Ismaili, M. 2008. Evaluation of the  $^{15}\text{N}$  isotope dilution technique for estimating crop nitrogen uptake from organic residues. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 39:938-950.
- Ghosh, S., Wilson, B., Ghoshal, S., Senapati, N. and Mandal, B. 2012. Organic amendments influence soil quality and carbon sequestration in the Indo-Gangetic plains of India. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 156:134-141.
- Ghoshal, N. 2002. Available pool and mineralization rate of soil N in a dryland agroecosystem: Effect of organic soil amendment and chemical fertilizer. *Tropical Ecology* 43(2):363-366.
- Glasener, K.M., Waggoner, M.G., MacKown, C.T. and Volk, R.J. 2002. Contributions of shoot and root nitrogen-15 labeled legume nitrogen sources to a sequence of three cereal crops. *Soil Science Society of American Journal* 66:523-530.
- Hart, P.B.S., Rayner, J.H. and Jenkinson, D.S. 1986. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with  $^{15}\text{N}$ . *Journal of Soil Science* 37:389-403.
- Hauck, R.D. and Bremner, J.M. 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Advances in Agronomy* 28:219-266.
- Haynes, R.J. 1997. Fate and recovery of  $^{15}\text{N}$  derived from grass/clover residues when incorporated into a soil and cropped with spring or winter wheat for two succeeding seasons. *Biology Fertility Soils* 25 (2):130-135.
- Henriksen, T.M. and Breland, T.A. 1999. Nitrogen availability effects on carbon mineralization, fungal and bacterial growth,

- and enzyme activities during decomposition of wheat straw in soil. *Soil Biology Biochemistry* 31:1121-1134.
- Hood, R. 2001. Evaluation of a new approach to nitrogen-15 isotope dilution technique, to estimate crop N uptake from organic residues in the field. *Biology and Fertility of Soils* 34:156-161.
- Hood, R., Mercks, R., Jensen, E.S., Powlson, D., Matijevic, M. and Hardarson, G. 2000. Estimating crop N organic residues using a new approach to the <sup>15</sup>N isotope dilution technique. *Plant and Soil* 223: 33-44.
- Hood, R., N'Goran, K., Aigner, M. and Hardarson, G. 1999. A comparison of direct and indirect <sup>15</sup>N isotope techniques for estimating crop N uptake from organic residues. *Plant and Soil* 208: 259-270.
- IAEA. 1990. Use of nuclear techniques in studies of soil – plant relationships. Training course series No. 2. Hardarson, G. (Ed.). International Atomic Energy Agency, Vienna. 223pp.
- IAEA, 2001. Manuel on the use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition. Training course series No. 14. Hardarson, G. (Ed.). International Atomic Energy, Vienna. 247pp.
- Ichir, L.L. and Ismaili, M. 2003. Recovery of wheat residue nitrogen-15 and residual effects of N fertilization in wheat – wheat cropping system under Mediterranean conditions. *African Crop Science Journal*. 11(1):27-34.
- Ismaili, M., Ichir, L.L., Alami, N. and Elabbadi, K. 2003. Recovery of fertilizer crop-residue <sup>15</sup>N and effects on N fertilization in three cropping systems under Mediterranean conditions. *IAEA TECDOC* 1354: 57-69.
- Jenkinson, D.S., Fox, R.H., Rayner, J.H. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – so called 'priming' effect. *Journal of Soil Science* 36:425-444.
- Jensen, E.S. 1996a. Nitrogen acquisition by pea and barley and the effect of their crop residues on available nitrogen for subsequent crops. *Biol Ferti Soils* 23(4): 459-464.
- Jensen, E.S. 1996b. Compared cycling in a soil-plant system of pea and barley residue nitrogen. *Plant and Soil* 182(1):13-23.
- Keshavaiah, K.V., Palled, Y.B., Shankaraiah, C., Channal, H.T., Nandihalli, B.S. and Jagadeesha, K.S. 2012. Effect of nutrient management practices on nutrient dynamics and performance of sugarcane. *Karnataka Journal of Agricultural Science* 25(2):187-192.
- Konboon, Y., Blair, G., Lefroy, R. and Whitbread, A. 2000. Tracing the nitrogen, sulfur, and carbon released from plant residues in a soil/plant system. *Australian Journal of Soil Research* 38:699-710.
- Kouyaté, K., Franzluebbers, K., Juo, A.S.R. and Houssner, L.R. 2000. Tillage, crop residues, legume rotation, and green manure effects on sorghum and millet yields in the semiarid tropics of Mali. *Plant and Soil* 225(1-2): 141-151.
- Kumar, K., Goh, K.M., Scott, W.R. and Frampton, C.M. 2001. Effects of <sup>15</sup>N-labelled crop residues and management practices on subsequent winter wheat yields, nitrogen benefits and recovery under field conditions. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)* 136: 35-53.
- Kumarasinghe, K.S. and Eskew, D.L. 1993. Comparison of direct and indirect <sup>15</sup>N methods for evaluation of N uptake by rice from *Azolla*. pp.16–21. In: Kumarasinghe K.S. and Eskew, D.L. (Ed.). *Isotopes studies of Azolla and nitrogen fertilization of Rice*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Lu, C., Chen, X., Shen, S., Shi, Y., Ma, J. and Zhao, M. 2013. Use efficiency and residual effect of <sup>15</sup>N-labelled ryegrass green manure over a 9-year field micro-plot experiment. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13 (3):544-555.
- Martínez-Alcántara, B., Martínez-Cuenca, M-R., Fernández, C., Legaz, F. and Quiñones, A. 2016. Production of <sup>15</sup>N-labelled liquid

- organic fertilisers based on manure and crop residue for use in fertigation studies. *PLoS ONE* 11(3): <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0150851>
- McAuliffe, C., Chamblee, D.S., Uribe Arango, H. and Woodhouse, W.W. 1958 Influence of inorganic nitrogen on nitrogen fixation by legume as revealed by <sup>15</sup>N dilution methods. *Plant and Soil* 102:149-160.
- Merckx, R., Powlson, D. and Jensen, E.S. 1997. Indirect measurement of nutrient release from organic residues. *Rapport FAO / AIEA Juin*. 11pp.
- Mohanty, M., Sinha, K.N.K., Reddy S., Chaudhary, R.S., Rao, A.S., Dalal, R.C. and Menzies, N.W. 2013. How important is the quality of organic amendments in relation to mineral N availability in soils? *Agricultural Research* 2(2):99-110.
- Morris, P.J. and Parrish, D.J. 1992. Effects of sunflower residues and tillage on winter wheat. *Field Crop Research* 29:317-327.
- Nicolardot, B. et Recous S. 2001. Matières organiques et activités biologiques des sols cultivés: Décomposition des résidus : Une affaire d'histoire culturelle et de travail du sol. *Perspect Agric* 272:49-53.
- Nicolardot, B., Recous, S. and Mary, B. 2001. Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues. *Plant Soil* 228:83-103.
- Nourbakhsh, F. and Dick, R.P. 2005. Net nitrogen mineralization or immobilization potential in a Residue-Amended Calcareous Soil. *Arid Land Research and Management*. 19 (4):299-306.
- Powell, J.M. and Wu, Z. 1999. Nitrogen-15 labeling of dairy feces and urine for nutrient cycling studies. *Agronomy Journal* 91: 814-818.
- Powlson, D.S., Jenkinson, D.S. and Johnston, A.E. 1985. The effect of straw incorporation on the uptake of nitrogen by winter wheat. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 36:26-30.
- Rodrigues, M.A., Pereira, A., Cabanas, J.E., Dias L., Pires J. and Arrobas M. 2006. Crops use-efficiency of nitrogen from manures permitted in organic farming. *European Journal of Agronomy* 25(4):328-335.
- Sørensen, P., Jensen, E.S. and Nielsen, N.E. 1994. Labeling of animal manure with <sup>15</sup>N. *Plant and Soil* 162:31-37.
- Sørensen, P. and Jensen, E.S. 1998. The use of <sup>15</sup>N labelling to study the turnover and utilization of ruminant manure. *Biology and Fertility of Soils* 28:56-63.
- Sørensen, P. and Thomsen, I.K. 2005. Production of nitrogen-15-labeled pig manure for nitrogen cycling studies. *Soil Science Society of American Journal* 69:1639-1643.
- Soon, Y.K. 1999. Crop residue and fertilizer management effects on nutrient use and barley production. *Canadian Journal of Soil Science* 79:389-394.
- Stockdale, E.A. and Rees, R.M. 1995. Release of nitrogen from plant and animal residues and consequent plant uptake efficiency. *Biological Agriculture and Horticulture* 11: 229-245.
- Vanlauwe, B., Sanginga, N. and Merckx, R. 1998. Recovery of Leucaena and Dactyladenia residue nitrogen-15 in alley cropping systems. *Soil Science Society of American Journal* 62 (2): 454-460.
- Wang, C.H. 2013. Different organic materials on crop production under a rice-corn cropping sequence. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 44(20): 2987-3005.
- Watkins, N. and Barraclough, D. 1996. Gross rates of N mineralization associated with the decomposition of plant residues. *Soil Biology and Biochemistry* 28:169-175.
- Witty, J.F. and Ritz, K. 1984. Slow release <sup>15</sup>N fertilizer formulation to measure N<sub>2</sub> fixation by isotope dilution. *Soil Biology and Biochemistry* 16:657- 661.
- Xavier, F.S., Maia, S.F., Ribeiro, K.A., Mendonça, E.S. and Oliveira, T.S. 2013.

- Effect of cover plants on soil C and N dynamics in different soil management systems in dwarf cashew culture. *Agriculture Ecosystem Environment* 165: 173-183.
- Zagal, E., Rodriguez, N., Vidal, I. et Hofmann, G. 2003. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uso de residuos. *Agricultura Técnica (chile)* 63 (3):298-310.
- Zavattaro, L., Monaco, S., Sacco, D. and Grignani, C. 2012. Options to reduce N loss from maize in intensive cropping systems in Northern Italy. *Agriculture. Ecosystem and Environment* 147:24- 35.