

Azote minéral résiduel et son évolution pendant l'été en fonction du précédent cultural en climat méditerranéen

H. Berdai⁽¹⁾, N. Aghzar⁽²⁾, F. Z. Cherkaoui⁽³⁾ et B. Soudi⁽⁴⁾

- (1) Service des Expérimentations, des Essais et de la Normalisation (SEEN) de l'Administration du Génie Rural. Laboratoire de Conservation des Eaux et des Sols. 461, Avenue Hassan II, Akkari, Rabat, Maroc.
- (2) Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Département de Biologie - Rabat, Maroc.
- (3) Office de Mise en Valeur Agricole du Tadla
- (4) Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc.

RÉSUMÉ

Dans les zones d'intensification agricole des pays méditerranéens, l'azote minéral résiduel après récolte constitue une source majeure de nitrate pouvant être lixivie au delà de la zone racinaire au cours d'une campagne agricole.

La présente étude a été conduite dans le périmètre irrigué du Tadla (Maroc). La fertilisation azotée abusive adoptée par les agriculteurs pour les principales cultures d'une part et le fort pouvoir de minéralisation des sols d'autre part, laissent un reliquat important d'azote minéral dans le sol. Ce reliquat, dont près de la moitié sous forme nitrique, est évalué en moyenne sur la profondeur 0-100 cm à 430, 247, 235, 208 et 162 kg/ha respectivement pour les précédents culturaux : maraîchage, betterave à sucre, jachère, céréales et luzerne. Le suivi de l'azote minéral du sol pendant la période estivale a été réalisé dans les mêmes parcelles non cultivées après récolte. Ce suivi a montré que, en dépit des faibles humidités, l'ammonification persiste et génère une augmentation de la teneur en ammonium dans le sol. Après le retour des premières pluies automnales, des quantités appréciables d'azote minéral variant de 5 à 20 mg/kg dans la couche 0 - 100 cm du sol, de prédominance nitrique, sont libérées dans le sol pour tous les précédents culturaux sauf pour le précédent céréales où se produit une organisation de l'azote. Le taux d'accroissement de N minéral dans la couche 0-100 cm, entre la fin de l'été et les premières pluies, est de 89, 47, 51 et 17 % respectivement pour les précédents luzerne, cultures maraîchères, betterave à sucre et jachère. Il diminue de 21 % pour les céréales. Le rapport $N_{\text{aut}}/N_{\text{total}}$ est assez variable (entre 0,60 et 2,94) suggérant que la minéralisation provient d'un effet « flush » et de la minéralisation de la matière organique du sol, des résidus de récolte et du fumier de ferme. L'importance du stock d'azote minéral dans le sol, en début de période drainante, lié à l'azote minéral résiduel à la récolte et à son évolution pendant l'été constitue un risque de pollution de la nappe par les nitrates. Ce risque dépend de la nature du précédent cultural. Les résultats de cette étude ont permis d'émettre quelques recommandations : la fertilisation nécessite d'être rationalisée en vue d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote et de réduire l'azote minéral résiduel à un niveau acceptable pour prévenir la lixiviation des nitrates tout en maintenant un niveau de production satisfaisant et économiquement rentable. Pour cela, des essais de démonstration ayant pour objectif la réduction des doses d'engrais azotés apportées, similaires à ceux conduits pour le blé et la betterave à sucre nécessitent d'être généralisés pour l'ensemble des cultures.

Mots clés

Azote minéral résiduel, précédent cultural, minéralisation, immobilisation, pollution, nitrates, eaux souterraines.

SUMMARY**RESIDUAL MINERAL NITROGEN AND ITS EVOLUTION DURING SUMMER IN RELATION WITH PREVIOUS CROPS IN MEDITERRANEAN AREA**

In the Mediterranean irrigated agricultural areas, soil residual mineral nitrogen constitute an important source of nitrate which may be leached beyond the root zone during the cropping season. The present study was conducted in the irrigated Tadla region (Morocco). Nitrogen fertilization adopted by farmers for the main crops and the high soil mineralization capacity generate large quantities of mineral nitrogen at harvest, 50 % of which is composed of nitrate. The average values found were : 430, 247, 235, 208 and 162 kg/ha (0-100 cm) for vegetable crops, Sugar beet, fallow, cereals and alfalfa respectively as previous crops. Soil mineral nitrogen was monitored after harvest during summer period on fallow soils. Results showed that ammonification process was active despite low water contents, increasing soil ammonium content. Large amounts of mineral nitrogen were observed after the first autumnal rains. They vary from 5 to 20 mg/kg in 0 - 100 cm soil layer especially the nitrate form, except for cereals for which net immobilization occurred. The rate of increase of mineral nitrogen in autumn was 1,89, 1,47, 1,51 et 1,17 for alfalfa, vegetable crops, Sugar beet and Fallow respectively against 0.79 for cereals.

The ratio of N_{aut} / N_{total} is quite variable (between 0.60 and 2.94), suggesting that the mineralization results from various processes : flush effect, mineralization from soil, crops residues and farm manure.

The importance of stored soil mineral nitrogen at the beginning of the drainage period which is related to residual mineral nitrogen at harvest and its evolution during summer constitutes a risk of ground water nitrate pollution. This hazard depend on the nature of the previous crop.

The results of our study led to the following recommendations : fertilization requires to be rationalized in order to improve nitrogen use efficiency and to reduce residual mineral nitrogen at an acceptable level to prevent nitrates leaching while maintaining a satisfying and economic rent production level. Demonstration trials having as objective to reduce applied nitrogen quantities, similar to those conducted for wheat and sugar beet, have to be generalized for all crops.

Key-words

Residual soil mineral nitrogen, previous crop, mineralization, immobilization, pollution, nitrate, ground water.

RESUMEN**NITRÓGENO MINERAL RESIDUAL Y SU EVOLUCIÓN DURANTE EL VERANO EN FUNCIÓN DEL PRECEDENTE CULTURAL EN CLIMA MEDITERRÁNEO**

En las zonas de intensificación agrícola en los países mediterráneos, el nitrógeno mineral residual post cosecha constituye un fuente mayor de nitrato que puede ser lixiviado mas allá de la zona de raíces en el curso de un campaña agrícola.

El presente estudio fue conducido en el perímetro irrigado de Tadla (Marruecos). La fertilización nitrogenada abusiva adoptada por los agricultores para los principales cultivos y el fuerte poder de mineralización de los suelos, dejan un alcance importante de nitrógeno mineral en el suelo. Este alcance, cuyo cerca de la mitad es bajo forma nítrica, se evalúa sobre la profundidad de 0-100cm a 430, 247, 235, 208 y 162 kg/ha respectivamente para los precedentes culturales: hortalizas, remolacha azucarera, barbecho, cereales, alfalfa. El seguimiento del nitrógeno mineral del suelo durante el periodo de verano se realizo en las mismas parcelas no cultivadas después de la cosecha. Este seguimiento muestra que, mismo con humedades bajas, la amonificación persiste y genera un aumento del contenido en amonio en el suelo. Después del retorno de las primeras lluvias de otoño, cantidades apreciables de nitrógeno mineral que varia de 5 a 20 mg/kg en la capa 0 – 100 cm del suelo, donde predomina el nitrato, son liberados en el suelo para todos los precedentes culturales salvo para el precedente cereal donde se produce una organización del nitrógeno. La tasa de aumento de N mineral en la capa 0 – 100 cm, entre el fin del verano y las primeras lluvias es de 89, 47, 51, y 17 % respectivamente para los precedentes alfalfa, hortalizas, remolacha azucarera y barbecho. Disminuye de 21 % para las cereales. La tasa N_{aut} / N_{total} es bastante variable (entre 0,6 y 2,94) lo que sugiere que la mineralización proviene de un "flush effect" y de la mineralización de la materia orgánica del suelo, de los residuos de cosecha y del estiércol. La importancia del stock de nitrógeno mineral en el suelo, al principio del periodo de drenaje, ligada al nitrógeno mineral residual de la cosecha y a su evolución durante el verano constituye un riesgo de polución del manto freático por los nitratos. Este riesgo depende de la naturaleza del precedente cultural. Los resultados de este estudio permitieron hacer algunas recomendaciones: la fertilización necesita ser racionalizada en vista de mejorar la eficiencia del nitrógeno y de reducir el nitrógeno mineral residual a un nivel aceptable para prevenir la lixiviación de los nitratos y mantener un nivel de producción satisfactorio y económicamente rentable. Por eso, ensayos de demostración que tienen para objetivo la reducción de las dosis de fertilizantes nitrogenados aportados, similares a los conducidos para el trigo y la remolacha azucarera necesitan ser generalizados para el conjunto de los cultivos.

Palabras claves

Nitrógeno mineral residual, precedente cultural, mineralización, imobilización, polución, nitratos, aguas subterráneas.

Dans les périmètres d'intensification agricole des pays méditerranéens, l'azote minéral résiduel constitue l'un des facteurs déterminants du risque potentiel de lixiviation des nitrates au-delà de la zone racinaire. En effet, l'azote minéral résiduel, se trouvant dans le sol après récolte des cultures constitue, dans le cas où le sol reste nu jusqu'à la période pluviale, non seulement une perte économique pour l'agriculteur mais également une source importante de nitrates pouvant être exposée en début de campagne agricole au phénomène de lixiviation. Ce risque est d'autant plus grave que les pluies automnales sont importantes et qu'elles surgissent très tôt dans le cycle alors que les besoins en azote des cultures nouvellement installées sont encore faibles. L'irrigation non maîtrisée concourt également à l'entraînement des nitrates en profondeur.

Pendant ces dix dernières années, l'évaluation de l'azote minéral résiduel (NMR), a suscité l'intérêt des chercheurs dans plusieurs régions du monde (Wehrmann *et al.*, 1989; Keeney et Follet, 1991; Follet *et al.*, 1994; Boman *et al.*, 1995; Goderya *et al.*, 1998), et notamment dans les pays à climat tempéré (Harrus et Fahner, 1987; Neeteson et Ehlert, 1989; Machet et Mary, 1990; Hofman et Verdegem, 1990; Neeteson, 1994 et Németh, 1994). Le NMR est considéré comme source potentielle de pollution de la nappe par les nitrates. La proportion de NMR lixivié dépend essentiellement de la répartition pluviométrique, de l'occupation du sol et du stade végétatif des cultures pendant les périodes de drainage. Il est également considéré comme indice d'efficacité de la fertilisation azotée des cultures notamment dans les zones sèches où les risques de pertes de N-NO_3^- par lixiviation sont minimes (Thompson et Whitney, 1998 et Westfall *et al.*, 1996).

Le niveau du NMR varie considérablement en fonction du climat, de la nature du sol et des pratiques culturales adoptées. En étudiant deux types de sol, Johnson *et al.* (1996) ont rapporté que dans le cas d'un sol sableux, le NMR n'augmente que de 0,05 kg/ha par kg d'azote appliqué; cette augmentation est quatre fois plus importante pour un sol argileux. Ceci a été expliqué par la grande capacité de rétention d'eau et la faible lixiviation des nitrates dans le cas du sol argileux. Une accumulation plus importante du NMR a été également observée lorsque les prélèvements d'azote par les plantes sont faibles par rapport à la dose d'azote appliquée et la fourniture d'azote par le sol (Neeteson et Ehlert, 1989; Neeteson *et al.*, 1994; Follet *et al.*, 1994; Németh, 1994; Warncke, 1996; Vanden Boogard et Thorup Kristensen, 1997 et Corbeels *et al.*, 1999). Le NMR est également influencé par le type d'engrais utilisé et le moment d'apport. Ainsi, l'application d'ammonium anhydre augmente le NMR par rapport à d'autres traitements comportant l'urée et le nitrate d'am-

monium (Boman *et al.*, 1995). L'application de la fertilisation azotée ou minérale en automne à un maïs fourrager, dans les conditions climatiques de la région côtière Sud de la Colombie Britannique (Canada), laisse des quantités importantes de NMR dans le sol par rapport à un apport au printemps (Zebarth *et al.*, 1996). Le même résultat est obtenu pour une plantation tardive par rapport à une plantation précoce (Johnson *et al.*, 1996). La pratique de l'interculture permet la consommation du NMR par les cultures et par conséquent la diminution du risque de pollution de la nappe par les nitrates. Pour une monoculture de maïs, l'introduction du ray-grass d'Italie en interculture a permis de réduire le NMR de 47 % (Zhou *et al.*, 1997). Les traitements phytosanitaires ayant une action bactéricide et antimicrobienne, peuvent également diminuer le NMR à cause d'une réduction de l'activité minéralisatrice des sols (Harrus et Fahner, 1987). Des cas contraires d'augmentation de la minéralisation sont observés après application du bromure de méthyle liés à l'effet de stérilisation partielle du sol (Souidi, communication personnelle). Certains systèmes de labour augmentent le NMR agissant favorablement sur la minéralisation de la matière organique du sol (Katupitiya *et al.*, 1997).

Le NMR varie également en fonction du précédent cultural. Une synthèse bibliographique réalisée par Neeteson (1994) dans les conditions d'Europe de l'Ouest, montre que le NMR est plus élevé après pomme de terre qu'après betterave sucrière ou céréales lorsque ces cultures reçoivent la fertilisation azotée recommandée. Ainsi pour des apports de 120-130 kg N/ha pour la betterave à sucre et 80 à 210 kg N/ha pour les céréales, le NMR est évalué à 10-40 kg N/ha. Il atteint 75 - 100 kg N/ha pour la pomme de terre recevant entre 200 et 300 kg N/ha montrant ainsi que la pomme de terre est une culture moins efficace en N. Des résultats similaires ont été obtenus dans le cas de la pomme de terre par Hofman et Verdegem (1990). Pour les autres cultures maraîchères recevant entre 50 et 300 kg N/ha, les valeurs de NMR sont en général faibles à modérées (20-75 kg N/ha) (Neeteson, 1994). Elles dépassent, toutefois, 200 kg N/ha pour les cultures récoltées avant leur maturation telles que les épinards fertilisés à la dose 215 à 290 kg N/ha. Le risque de lixiviation des nitrates durant la période hivernale suivante est aggravé si les résidus de récolte enfouis dans le sol sont riches en azote: c'est le cas de la betterave (50-150 kg N/ha) et des cultures maraîchères telles que le chou (100-200 kg N/ha) (Wehrmann *et al.*, 1989 et Neeteson, 1994). L'analyse de ces résultats montre que l'effet de la nature du précédent cultural sur les valeurs du NMR dépend des doses d'engrais azotés utilisées et par conséquent du bilan d'azote dans le système sol-plante.

Pour les prairies et le maïs fourrager, le risque de lixiviation des

nitrate est important essentiellement lorsque les parcelles sont pâturées en raison des apports excessifs en azote par les excréments animaux. Le NMR a été évalué en moyenne à 150 kg N/ha et peut même atteindre des valeurs plus élevées par endroit donnant lieu à une variabilité spatiale importante du NMR dans les zones de pâturage (Neeteson, 1994).

Dans les conditions des zones arides à semi-arides irriguées des pays méditerranéens, peu de données concernant le NMR sont disponibles dans la littérature. Pourtant dans ces régions, l'azote minéral résiduel revêt une grande importance (i) pour l'évaluation du risque de lixiviation des nitrates et (ii) dans l'élaboration du plan de fumure et surtout dans la stratégie du fractionnement des apports d'azote. De plus, dans ces régions, la récolte des grandes cultures, blé et betterave à sucre notamment, a lieu généralement en début d'été et le NMR pourrait varier pendant la saison estivale et après l'arrivée des premières pluies automnales de sorte qu'on se retrouverait en début de campagne agricole suivante avec des quantités d'azote minéral dans le sol totalement différentes de celles évaluées à la récolte. Dans le même contexte pédo-climatique, l'évolution du NMR pendant la phase d'interculture serait essentiellement pilotée par les facteurs écologiques : température et humidité du sol.

Les objectifs de la présente étude consistent en l'évaluation du NMR pour plusieurs précédents culturels dans le périmètre irrigué du Tadla ainsi que son évolution à la sortie de la saison estivale et après le retour des premières pluies automnales.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La plaine du Tadla se situe dans le bassin de l'Oued Oum Er Rebia (*Carte 1*) qui traverse la plaine et la partage en deux grands périmètres irrigués : Béni Amir au Nord et Béni Moussa au Sud dont les superficies irriguées sont respectivement de 33 000 ha et 69 500 ha. L'irrigation, essentiellement gravitaire, se fait à partir des eaux de surface et des eaux souterraines. Les sols prédominants sont des sols isohumiques bruns calcaires généralement profonds.

Le climat de la plaine est de type méditerranéen semi-aride à hiver froid. La moyenne annuelle des précipitations sur 38 ans (1951-89) est de 393,1 mm. Les mois les plus pluvieux sont mars et avril avec un cumul mensuel de 60,3 et 53,7 mm respectivement. La période sèche s'étale entre fin mai jusqu'à mi-octobre. Les moyennes mensuelles des températures maximales sont de 37,8 et 37,5 °C respectivement pour juillet et août. Par contre les mois les plus froids sont décembre et janvier avec des températures minimales mensuelles respectivement de 3,9 et 3,4 °C. L'évaporation moyenne annuelle est de l'ordre de 1 816 mm. Elle est maximale en juillet-août (10 mm/j) et minimal en décembre (1,7 mm/j).

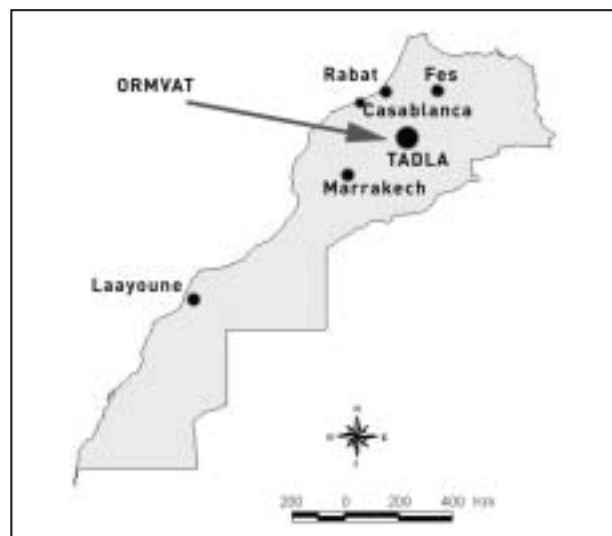
D'après les données sur l'occupation du sol par centre de développement agricole (Campagne 1995-1996, Données ORMVAT), la céréaliculture prédomine dans la totalité du périmètre. Les autres spéculations concernent principalement la betterave, les cultures maraîchères, la luzerne et l'arboriculture (olivier et agrumes), et sont

réparties d'une manière différente selon les zones. Les légumineuses sont peu représentées. Les successions culturales pratiquées dans la région sont nombreuses, la plus dominante est la rotation blé-betterave. Parmi les cultures maraîchères pratiquées, citons particulièrement le niora, le sésame et l'oignon. Leurs précédents culturels sont essentiellement des cultures maraîchères ou des céréales. La luzerne est souvent installée après luzerne ou céréales (Aghzar *et al*, en cours de publication).

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'évaluation du NMR a été faite sur 25 parcelles choisies au hasard dans le périmètre irrigué du Tadla et représentant 5 précédents culturels différents (*carte 2*). Chaque précédent est donc représenté par 5 parcelles. Les prélèvements de sol ont été effectués à la récolte qui correspond au début de la période estivale (juin), à la sortie de l'été (septembre) et après l'arrivée des premières pluies automnales (octobre, 48 heures après pluie). Notons que ces parcelles sont restées nues pendant l'été. Les précédents culturels ayant fait l'objet de cette étude sont : les céréales, la betterave à sucre, la luzerne, la jachère et les cultures maraîchères. Pour ces dernières, la récolte a eu lieu en septembre et non en juin. Les prélèvements d'échantillons ont été effectués dans les couches 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm et 80-100 cm. La méthode d'échantillonnage est celle de l'échantillon composite unique constitué à partir de 8 prélèvements. Les échantillons sont séchés à 40 °C. L'azote minéral est dosé, dans la terre broyée, tamisée à 2 mm et homogénéisée, par la méthode de distillation après une extraction au CaCl_2 0,01 M avec un rapport sol : solution de 1/10.

Carte 1 - Carte du Maroc situant le périmètre irrigué du Tadla.
Map 1 - Location of the irrigated Tadla region.



Les sols étudiés ont été soumis à une caractérisation physico-chimique au laboratoire comportant la granulométrie (méthode de la pipette de Robinson), le pH, le calcaire total (calcimètre de Bernard) le carbone organique (méthode Walkley-Black), l'azote total (méthode Kjeldahl) et l'indice de minéralisation par la méthode d'incubation anaérobie de Waring et Bremner (1964).

Pour chaque précédent cultural, les prélèvements des résidus de récolte ont été effectués dans trois parcelles différentes à raison de 2 placettes de 1 m² chacune par parcelle : soit au total 6 prélèvements par précédent cultural. Le poids de la matière sèche et les teneurs en carbone organique et en azote total ont été déterminés.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Caractérisation physico-chimique des sols

Le *tableau 1* présente les principales caractéristiques physico-chimiques du sol ainsi que l'indice de minéralisation de l'azote (appelé NWB). Les sols se caractérisent par une texture fine (limono-argileuse ou argilo-limoneuse) à très fine (argileuse). La fraction argileuse représente en moyenne 34 % dans la couche de surface 0-20 cm et augmente en profondeur pour atteindre 41 % au niveau 80-100 cm. Le pH est basique à cause d'une teneur élevée en cal-

caire total et varie entre 8,4 et 9,2. Les teneurs en carbone organique et en azote total de la couche 0-20 cm sont respectivement de 13,2 g/kg et 1,35 g/kg et diminuent progressivement en profondeur en atteignant des valeurs moyennes de 3,0 g/kg et 0,34 g/kg dans la couche 80-100 cm.

La capacité minéralisatrice de l'azote des sols évaluée par l'indice de minéralisation (ou fraction d'azote minéralisable) représentant la quantité d'azote ammoniacal libérée dans le sol après 7 jours d'incubation anaérobie à 40 °C, est élevée vu la qualité des sols et notamment leur texture et varie considérablement entre les sites et en fonction de la profondeur. Les quantités d'azote produites dans la couche 0-20 cm sont en moyenne de 52 mg/kg. La contribution potentielle des horizons inférieurs à la fourniture de N minéral par le sol n'est pas négligeable. En effet, les quantités d'azote minéralisé en incubation sont en moyenne de 35 mg/kg et 16 mg/kg respectivement pour les couches 20-40 cm et 40-60 cm soit une contribution de 49 % de l'azote minéralisé entre 0 et 60 cm. Ces résultats rejoignent ceux obtenus par Soudi *et al* (1988) sur trois types de sol du Tadla : Isohumique verticale, Isohumique brun modal et Isohumique châtain. Ces auteurs ont en effet mesuré que la contribution relative des différentes couches de sol à la minéralisation évaluée après 16 semaines d'incubation aérobie a été de 38,4 % pour la couche de surface (0-20 cm), de 26 % à 50 % pour la couche 20-60 cm et de 4 % à 16 % pour la couche 60-120 cm.

Carte 2 - Réseau de suivi et de surveillance de la qualité des sols et des eaux dans le périmètre du Tadla.

Map 2 - Soil and water quality monitoring network in the Tadla region.

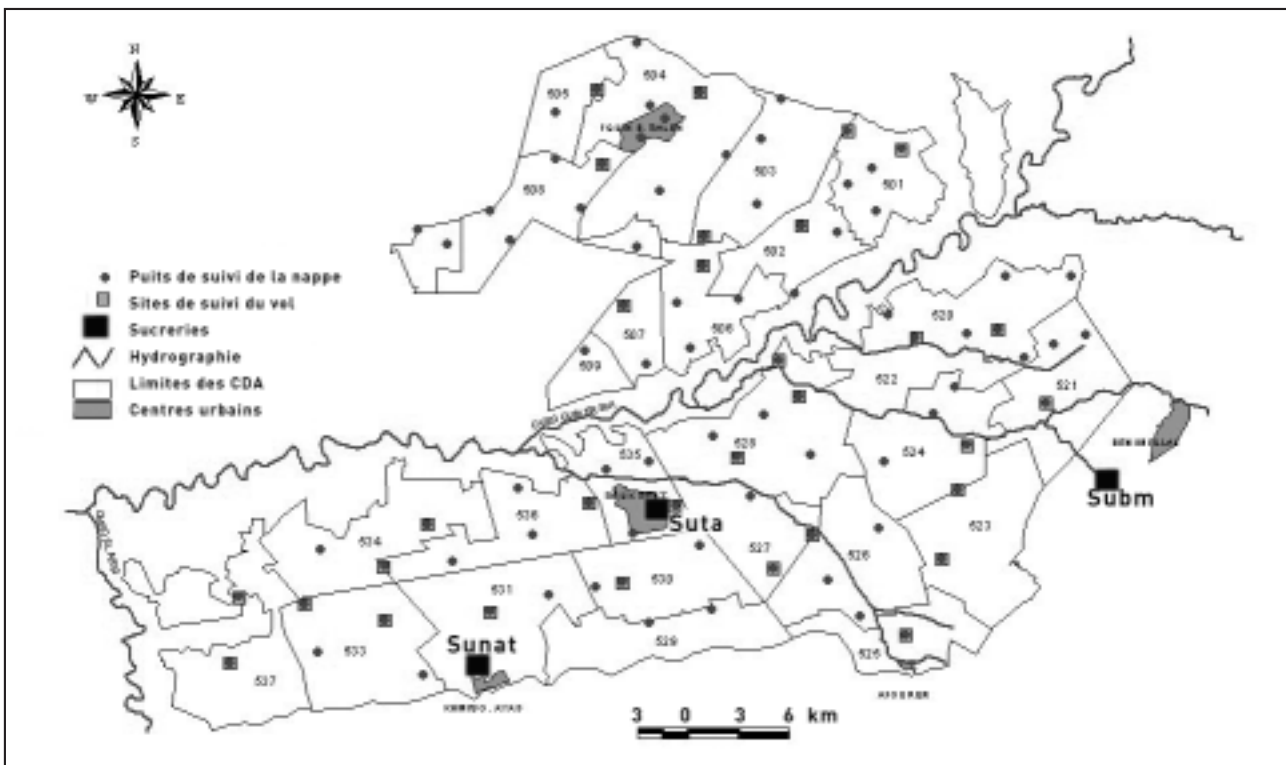


Tableau 1 - Caractéristiques physico-chimiques des sols pour les différents précédents culturaux.
Table 1 - Physical and chemical soil characteristics for different previous crops.

Précédent	Profondeur	A %	L %	S %	pH	CaCO ₃ tot %	C %	N tot %	N _{vb} mg/kg	N _{vb}
Céréales	0-20	33,25 (4,57)	42,00 (4,97)	24,89 (4,75)	8,58 (0,24)	12,18 (2,96)	1,48 (0,34)	0,144 (0,040)	62,36 (12,02)	4,35
	20-40	37,26 (6,92)	42,19 (3,45)	22,22 (7,12)	8,65 (0,17)	14,53 (4,45)	1,12 (0,21)	0,117 (0,023)	40,69 (11,23)	3,47
	40-60	35,75 (4,59)	40,92 (1,88)	25,42 (6,05)	8,80 (0,20)	18,27 (7,66)	0,52 (0,22)	0,052 (0,015)	20,58 (3,60)	3,93
	60-80	35,85 (5,61)	39,67 (2,10)	26,10 (4,36)	8,80 (0,20)	26,67 (9,48)	0,45 (0,20)	0,043 (0,013)		
	80-100	34,68 (3,75)	39,83 (1,81)	25,95 (2,57)	8,87 (0,15)	18,37 (3,16)	0,32 (0,17)	0,026 (0,018)		
Luzerne	0-20	32,86 (3,45)	38,49 (6,06)	28,89 (8,13)	8,78 (0,13)	13,44 (9,05)	1,34 (0,26)	0,139 (0,033)	53,95 (13,60)	3,88
	20-40	32,71 (3,67)	38,46 (8,23)	29,41 (9,54)	8,96 (0,17)	14,64 (7,48)	0,87 (0,18)	0,092 (0,029)	33,39 (13,37)	3,62
	40-60	33,39 (1,11)	39,30 (7,76)	27,28 (6,53)	9,03 (0,17)	15,85 (11,01)	0,39 (0,09)	0,043 (0,005)	11,94 (9,06)	2,76
	60-80	32,08 (4,99)	40,95 (10,39)	26,94 (5,52)	9,03 (0,17)	13,80 (8,83)	0,30 (0,05)	0,034 (0,003)		
	80-100	33,59 (4,39)	40,75 (11,13)	25,74 (5,36)	9,00 (0,08)	13,85 (7,94)	0,23 (0,01)	0,024 (0,009)		
Betterave	0-20	32,93 (3,20)	37,24 (4,72)	30,34 (6,40)	8,78 (0,15)	13,18 (6,50)	1,32 (0,09)	0,136 (0,006)	64,86 (20,98)	4,77
	20-40	36,10 (5,89)	33,62 (3,25)	30,13 (8,56)	8,98 (0,08)	19,04 (9,22)	0,83 (0,15)	0,088 (0,020)	38,09 (19,06)	4,31
	40-60	38,35 (5,00)	34,15 (4,33)	27,33 (7,05)	9,00 (0,14)	12,73 (11,63)	0,48 (0,21)	0,056 (0,019)	16,57 (12,27)	2,96
	60-80	39,50 (2,83)	35,15 (9,69)	24,14 (10,56)	9,15 (0,07)	15,95 (17,32)	0,21 (0,06)	0,031 (0,001)		
	80-100	40,90 (1,56)	35,75 (12,37)	22,88 (11,49)	9,15 (0,07)	9,25 (7,85)	0,17 (0,07)	0,026 (0,007)		
Jachère	0-20	36,22 (6,52)	38,00 (3,69)	27,21 (7,14)	8,60 (0,20)	11,36 (2,50)	1,22 (0,20)	0,130 (0,013)	40,25 (15,20)	3,10
	20-40	39,00 (7,44)	33,76 (1,79)	27,81 (8,65)	8,76 (0,24)	17,40 (5,03)	0,89 (0,07)	0,094 (0,014)	34,40 (13,45)	3,68
	40-60	42,28 (6,23)	33,85 (1,03)	24,55 (5,89)	8,70 (0,24)	12,58 (5,74)	0,66 (0,01)	0,073 (0,002)	17,16 (5,55)	2,34
	60-80	47,75 (0,00)	32,00 (0,00)	21,24 (0,00)	8,60 (0,00)	20,40 (0,00)	0,53 (0,00)	0,054 (0,000)		
	80-100	49,00 (0,00)	31,50 (0,00)	19,84 (0,00)	8,60 (0,00)	17,90 (0,00)	0,39 (0,00)	0,049 (0,000)		
Cultures maraichères	0-20	38,80 (5,76)	41,50 (4,18)	21,07 (1,94)	8,44 (0,09)	13,92 (6,97)	1,25 (0,32)	0,126 (0,019)	40,10 (20,37)	3,17
	20-40	43,65 (2,30)	39,30 (5,12)	19,12 (2,75)	8,52 (0,04)	13,02 (2,90)	1,00 (0,24)	0,097 (0,023)	28,48 (8,89)	2,95
	40-60	44,50 (2,61)	36,06 (4,46)	20,26 (1,20)	8,55 (0,06)	18,85 (3,61)	0,67 (0,07)	0,069 (0,007)	14,04 (6,33)	2,03
	60-80	45,44 (2,76)	34,75 (3,18)	21,27 (0,19)	8,60 (0,00)	26,08 (8,11)	0,56 (0,09)	0,055 (0,002)		
	80-100	47,00 (3,46)	34,25 (3,23)	21,78 (2,43)	8,63 (0,05)	17,13 (1,55)	0,41 (0,08)	0,046 (0,004)		

A: argile L: limon S: sable MO: matière organique N tot: azote total N WR: Indice de minéralisation anaérobie du sol

La diminution de la minéralisation avec la profondeur est tout a fait logique étant donnée la diminution de la teneur en carbone organique et en azote total des couches inférieures. Néanmoins, certains auteurs avancent une autre explication liée à la diminution dans les couches inférieures de la biodégradabilité des composés azotés suite à une implication de l'azote aminé dans des formes plus complexes (Soudi *et al*, 1990a). Cette dernière hypothèse est également vérifiée. En effet, le rapport N minéralisé sur N total (NWB/Ntotal) ne reste pas constant mais diminue en fonction de la profondeur. Il est évalué à 3,85 %, 3,60 % et 2,80 % respectivement pour les couches 0-20 cm, 20-40 cm et 40-60 cm montrant ainsi que la teneur en N total et la biodégradabilité de l'azote organique seraient à l'origine de la contribution plus importante des couches de surface au processus de minéralisation.

Le rapport NWB/Ntotal présente une variabilité spatiale assez importante qui pourrait être attribuée à la variabilité des deux formes de N facilement minéralisable: N de la biomasse et une fraction de N organique du sol, les résidus de récolte étant en grande partie omis du sol lors du tamisage à 2 mm. Vu la nature assez homogène des sols étudiés, cette variabilité serait expliquée par l'histoire culturale qui diffère d'une parcelle à l'autre (succession culturale, fertilisation minérale et organique, rendements obtenus...) et par conséquent par l'hétérogénéité du compartiment N facilement minéralisable qui s'est constitué au fur et à mesure de la mise en culture intensive du sol.

Azote minéral résiduel et son évolution à la sortie de l'été et après les premières pluies

La *figure 1* représente la distribution verticale de N minéral nitrique et ammoniacal observée dans la couche 0-100 cm du sol à la récolte, à la sortie de l'été et après les premières pluies automnales pour les différents précédents culturaux.

Le NMR, évalué immédiatement à la récolte, est distribué dans le profil du sol d'une manière presque similaire pour tous les précédents culturaux. Sa répartition en profondeur est assez homogène et la forme ammoniacale est presque égale ou excède légèrement la forme nitrique (48 % à 63 % de NMR) contrairement aux conditions des régions tempérées où le NMR est presque entièrement sous forme de nitrate (Neeteson, 1994). Ce résultat pourrait être attribué au plus fort ralentissement de la nitrification que de la minéralisation, sous l'effet de la faible humidité du sol avant récolte (Soudi *et al.*, 1990b).

La quantité d'azote minéral à la récolte est maximale pour le précédent « cultures maraîchères » pour lequel le NMR est évalué à 31,8 mg N/kg soit l'équivalent de 430 kg N/ha dans la couche 0-100 cm du sol (*tableau 2*). Cette valeur dépasse de loin celle observée sous climat tempéré (Neeteson, 1994).

L'accumulation importante de N minéral dans le sol après récolte des cultures maraîchères serait liée à l'application de doses excessives en engrais azoté et d'une minéralisation intense de l'azote organique natif du sol favorisé par l'irrigation et par les conditions thermiques qui règnent pendant l'été. De plus, la fumure organique, souvent pratiquée par les agriculteurs pour les cultures maraîchères, n'est généralement pas prise en considération dans l'élaboration du plan de fumure. Pour les autres précédents culturaux, le NMR dans la couche 0-100 cm du sol est par ordre décroissant de 17,5, 16,9, 15,7 et 11,5 mg N/kg soit l'équivalent de 247, 235, 208 et 162 kg N/ha respectivement après betterave à sucre, jachère, céréales et luzerne. Ces précédents génèrent des quantités de NMR moins élevées que dans le cas du maraîchage mais assez importantes par rapport à celles rapportées dans la littérature et constituent de ce fait un risque potentiel de pollution nitrique des ressources en eaux souterraines.

Pour le même précédent cultural, une variabilité importante du NMR est observée entre les parcelles de suivi pour toutes les profondeurs du sol. Le coefficient de variation varie en effet entre 12 % et 90 % selon les précédents culturaux. Cette variabilité est moins accentuée si on prends en compte la teneur moyenne de N minéral dans la couche 0-100 cm (CV = 23 % à 33 %). Elle serait attribuée principalement à l'hétérogénéité des pratiques culturales adoptées par les agriculteurs de la région et à la variabilité des rendements obtenus.

À la sortie de l'été, une augmentation importante de N minéral, essentiellement sous forme ammoniacale, est notée pour tous les précédents culturaux et a concerné aussi bien les couches superficielles que les couches profondes. Le processus d'ammonification se poursuit donc pendant l'été dans l'entièreté du profil, en dépit des

faibles humidités du sol. Les quantités de $N-NH_4^+$ libéré entre la récolte et la sortie de l'été, sont évaluées dans la couche 0-100 cm à 5,98, 11,46, 12,07 et 13,19 mg/kg respectivement pour les précédents betterave, luzerne, jachère et céréales aboutissant à un taux d'accroissement de N minéral de 1,4, 1,9, 1,7 et 1,8 par rapport au NMR (*tableau 3*).

Pour ce qui est de l'azote nitrique, aucune variation notable de la teneur globale dans la couche 0-100 cm du sol n'a été observée. Le taux d'accroissement de $N-NO_3^-$ évalué pendant cette période est, en effet, resté proche de 1 (*tableau 3*).

L'activité nitrifiante serait donc fortement ralentie aux faibles humidités du sol. Néanmoins, une augmentation de la teneur en $N-NO_3^-$ est observée dans la couche superficielle au détriment d'une diminution de cette teneur dans les couches profondes (*tableau 3*). Cette augmentation se traduit par un pic de $N-NO_3^-$ et de N minéral au niveau de la couche 0-20 cm obtenu pour tous les précédents culturaux (*figure 1*). Tout se passe comme si il y avait une remontée des nitrates en surface suite au mouvement ascendant de la solution du sol par capillarité dû au fort pouvoir évaporant du climat pendant l'été et à la teneur élevée en argile des sols étudiés.

Après les premières pluies automnales, une augmentation importante de N minéral dans le sol (appelé Naut) est observée par rapport au stock évalué à la fin de l'été pour tous les précédents culturaux sauf pour les céréales. Elle serait liée à l'effet « flush » assez caractéristique des climats méditerranéens (Soudi et Chiang, 1989). Cet effet « flush » survient dès le rétablissement des conditions favorables d'humidité du sol après une période de dessiccation. Il est comparable au flush observé dans les pays tempérés après le froid hivernal (Deluca *et al.*, 1992). Cette augmentation (Naut) est évaluée dans la couche 0-100 cm du sol à 19,6, 15, 12,4 et 4,8 mg/kg soit 276, 202, 175 et 67 kg N/ha respectivement pour les précédents luzerne, cultures maraîchères, betterave à sucre et jachère (*tableau 4*). Elle représente un taux d'accroissement respectif de N minéral de 1,89, 1,47, 1,51 et 1,17 (*tableau 3*). Les quantités de N minéral ainsi libérées sont plus importantes dans les parcelles précédemment cultivées que celles laissées en jachère. De plus, l'accumulation de N minéral n'a pas eu lieu uniquement dans la couche de surface où la dessiccation estivale a été très poussée mais également dans les couches profondes. Ceci montre que l'effet « flush » se produisant après réhumectation du sol ne concerne pas uniquement la biomasse du sol mais également d'autres fractions de la matière organique. Ces fractions seraient constituées d'une part par l'azote organique facilement minéralisable du sol et d'autre part par une partie de la fumure organique non minéralisée pendant la première année qui est pratiquée dans la région essentiellement pour la luzerne et les cultures maraîchères. Par ailleurs, la minéralisation d'automne des résidus de récolte à C/N faible pourrait également contribuer à la fourniture naturelle du sol en azote minéral. Mais, elle n'expliquerait pas, à elle seule, les valeurs obtenues du Naut pour trois raisons : i) la matière sèche des résidus de récolte évaluée à 127, 837 et 2022 kg/ha respectivement pour la luzerne, les cultures maraîchères et la betterave (*tableau 5*) ne renferme que des quantités limi-

Figure 1 - Distribution verticale au cours de l'été de l'azote minéral dans le sol pour différents précédents culturaux.
Figure 1 - Vertical distribution of soil mineral nitrogen during summer for different previous crops.

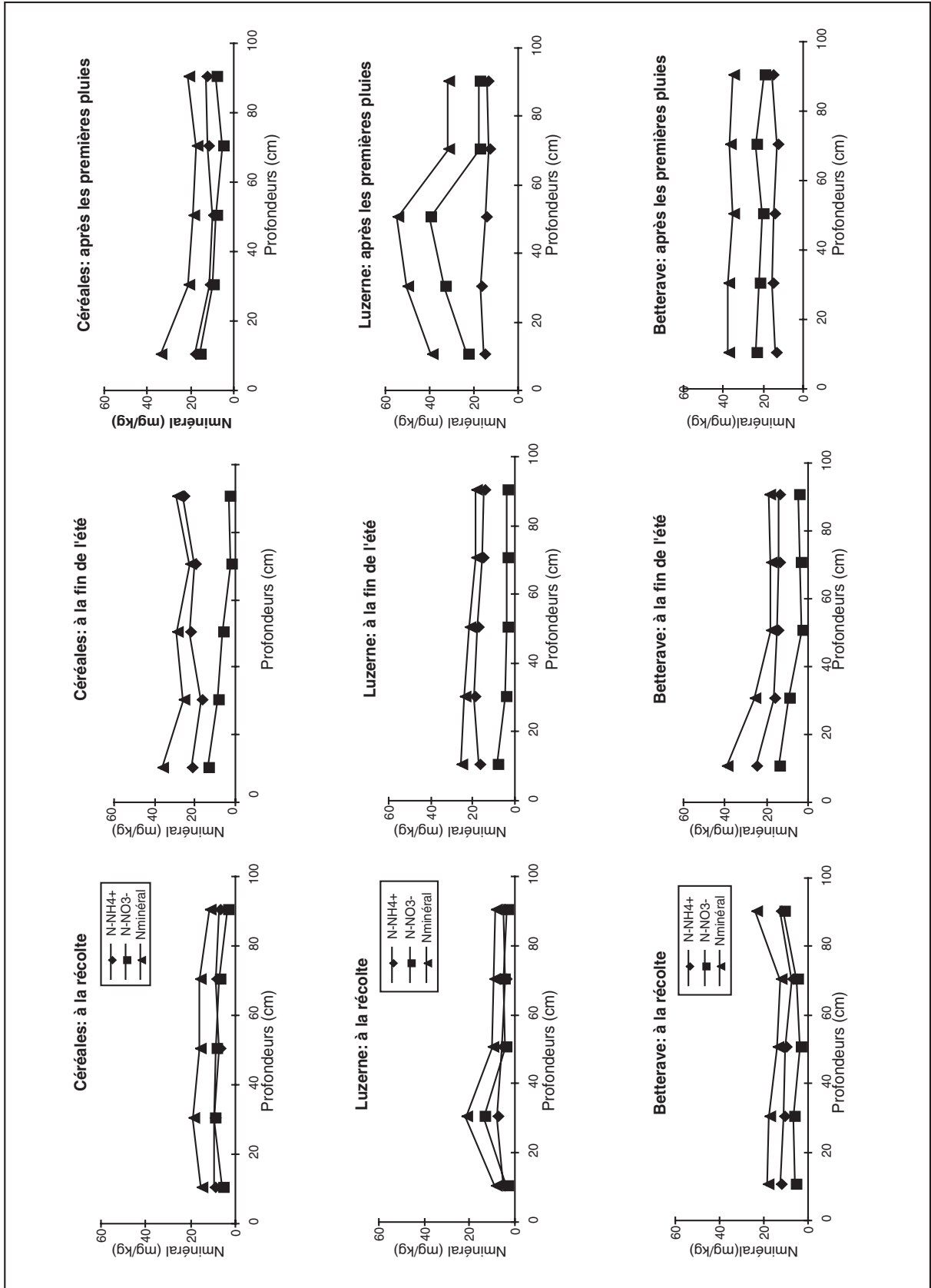
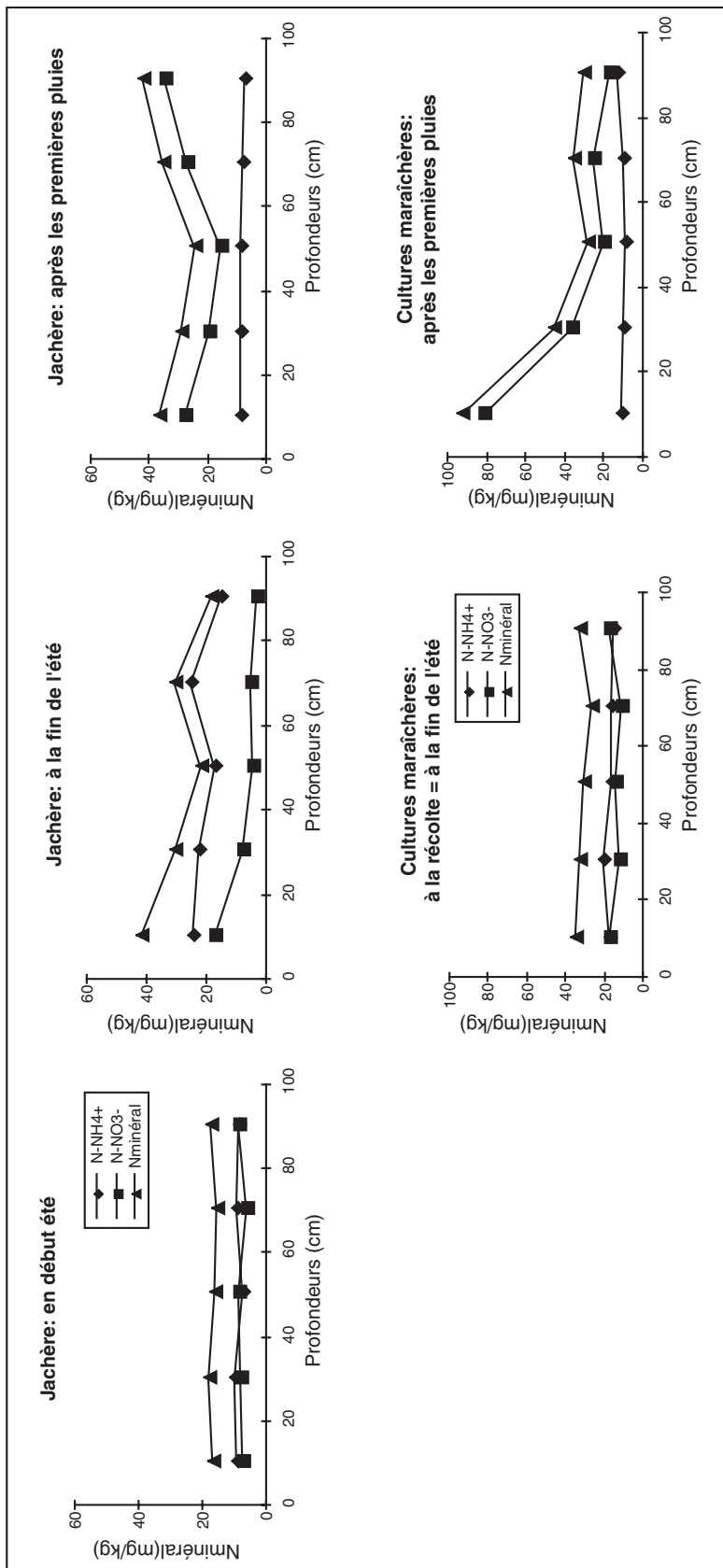


Figure 1 - Distribution verticale au cours de l'été de l'azote minéral dans le sol pour différents précédents culturaux (suite).
Figure 1 - Vertical distribution of soil mineral nitrogen during summer for different previous crops (continuation).



tées d'azote par rapport au Naut soit 0,6, 4,7 et 20,1 % seulement ; ii) la minéralisation de ces résidus de récolte à C/N variant de 22 à 30 ne pourrait pas avoir lieu directement après rehumectation du sol. En effet, les auteurs ayant étudié ce processus ont montré que la minéralisation des résidus de récolte à C/N faible n'est pas instantanée et permet de satisfaire une partie des besoins des cultures pendant les premiers stades de croissance (Aulakh *et al*, 1991 et Honeycutt *et al*, 1993) et finalement iii) au moment des prélèvements, les résidus de récolte n'étaient pas encore enfouis mais se trouvaient à la surface du sol. La minéralisation n'était donc pas optimale. En effet, Aulakh *et al* (1991) ont montré qu'après 35 jours d'incubation des résidus de la vesce (C/N = 8), à 60 % d'humidité de saturation, 36 % et 51 % d'azote ont été minéralisés respectivement dans le cas d'application en surface et d'incorporation des résidus au sol.

Une variation importante en fonction des précédents culturaux est également obtenue pour le rapport Naut/Ntotal. En effet, Le Naut représente 0,60 % de l'azote total du sol pour le précédent jachère. Un pourcentage plus important est obtenu pour les autres précédents culturaux soit 2,94 %, 1,89 % et 1,74 % respectivement pour la luzerne, les cultures maraichères et la betterave à sucre montrant que la minéralisation d'automne dépend de la nature du précédent cultural. Rapporté à l'indice de minéralisation (NWB), le Naut représente 59 %, 54 %, 31 % et 15 % respectivement pour les précédents luzerne, cultures maraichères, betterave à sucre et jachère. Nous remarquons que le taux d'accroissement de N minéral lié à l'effet « flush », le rapport Naut/Ntotal et le rapport Naut/NWB se classent tous de la même façon en fonction des précédents culturaux.

Les profils de N minéral dans le sol (*figure 1*) après les premières pluies montrent une distribution verticale différente en fonction des précédents culturaux. Pour les cultures maraichères, l'augmentation de N minéral a intéressé surtout les couches de surface. Le Naut est évalué à 57,4 mg/kg pour la couche 0-20 cm et 13,5 mg/kg pour la couche 20-40 cm alors qu'il ne dépasse guère 3,7 mg/kg dans la couche 40-100 cm. Ce

Tableau 2 - Teneur du sol en azote minéral résiduel (NMR) en fonction des différents précédents culturaux.**Table 2** - Residual soil mineral nitrogen content with respect to different previous crops.

Précédent cultural	Profondeurs	N-NH ₄ ⁺ mg/kg		N-NO ₃ ⁻ mg/kg		N minéral mg/kg	
Céréales	0-20	9,63	(3,51)	5,69	(3,38)	15,32	(6,82)
	20-40	9,54	(2,32)	9,84	(3,48)	19,39	(2,32)
	40-60	7,25	(1,78)	8,88	(2,82)	16,14	(1,97)
	60-80	8,78	(2,91)	7,55	(2,93)	16,33	(5,31)
	80-100	7,35	(3,70)	3,99	(1,72)	11,35	(5,06)
	Moyenne	8,51	(3,20)	7,19	(1,23)	15,70	(3,85)
Luzerne	0-20	4,84	(2,41)	3,47	(2,13)	8,32	(3,68)
	20-40	8,07	(3,45)	13,48	(9,59)	21,55	(12,84)
	40-60	5,43	(1,98)	4,48	(2,78)	9,91	(4,22)
	60-80	4,41	(2,98)	4,76	(1,87)	9,17	(3,57)
	80-100	5,02	(0,15)	3,46	(1,81)	8,48	(1,95)
	Moyenne	5,55	(1,73)	5,93	(2,16)	11,49	(3,83)
Betterave	0-20	12,79	(7,76)	5,87	(3,40)	18,65	(10,89)
	20-40	11,30	(3,72)	6,72	(1,69)	18,02	(4,77)
	40-60	10,02	(4,27)	4,03	(3,20)	14,06	(6,97)
	60-80	7,75	(4,06)	4,99	(1,76)	12,73	(5,62)
	80-100	12,94	(3,19)	11,10	(4,44)	24,04	(6,68)
	Moyenne	10,96	(3,96)	6,54	(2,31)	17,50	(6,02)
Jachère	0-20	9,61	(3,23)	7,23	(3,76)	16,84	(4,26)
	20-40	10,30	(8,46)	8,06	(8,58)	18,36	(16,49)
	40-60	7,29	(3,37)	8,70	(8,21)	15,98	(8,55)
	60-80	9,10	(3,91)	6,42	(3,38)	15,52	(6,40)
	80-100	8,67	(1,63)	8,98	(7,59)	17,65	(7,02)
	Moyenne	8,99	(2,81)	7,88	(3,25)	16,87	(4,89)
Cultures maraîchères	0-20	17,96	(2,18)	17,60	(5,99)	35,56	(7,94)
	20-40	20,20	(8,95)	12,49	(6,94)	32,69	(12,16)
	40-60	16,59	(2,03)	14,03	(13,85)	30,62	(14,35)
	60-80	16,08	(1,38)	11,07	(8,67)	27,15	(9,01)
	80-100	15,51	(2,82)	17,71	(14,08)	33,22	(15,84)
	Moyenne	17,27	(2,72)	14,58	(8,51)	31,85	(9,52)

type de profil de N minéral, présentant un pic en surface et une diminution en profondeur, serait dû à une activité minéralisatrice du sol plus importante dans les couches superficielles en raison de l'existence des substrats azotés (biomasse, humus, résidus, fumier) et des conditions écologiques plus favorables en surface qu'en profondeur. Ce type de profil suggère également que l'azote nitrique n'a pas encore migré dans le profil. Par contre, pour les précédents luzerne et betterave à sucre l'augmentation de N minéral a concerné toutes les profondeurs. Le N minéral se répartit d'une manière homogène pour la betterave et hétérogène pour la luzerne où un pic est noté

au niveau de la couche 20-60 cm et qui serait due non pas au stock d'azote dans les Rhizobium, qui est très faible, mais au bilan global d'azote pour cette culture. Pour le précédent jachère, le profil de N minéral est presque semblable à celui observé à la fin de l'été avec une légère augmentation dans la couche 40-100 cm.

Pour le précédent céréales, une diminution nette de N minéral est opérée dans tout le profil. Le Naut est évalué à -1,8 mg/kg, -5,0 mg/kg, -9,2 mg/kg, -4,7 mg/kg et -11,9 mg/kg respectivement dans les couches 0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm, 60-80 cm et 80-100 cm,

Tableau 3 - Taux d'accroissement de l'azote ammoniacal, nitrique et minéral durant les périodes de suivi pour différents précédents culturaux.
Table 3 - Ammonium, nitrate and mineral nitrogen increase rate during the monitoring periods for different previous crops.

Précédent cultural	Profondeurs cm	N2/N1			N3/N2			N3/N1		
		N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Nminéral	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Nminéral	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Nminéral
Céréales	0-20	2,31	2,44	2,36	0,81	1,14	0,94	1,88	2,77	2,21
	20-40	1,82	0,91	1,35	0,67	1,09	0,81	1,22	0,99	1,10
	40-60	3,11	0,73	1,80	0,45	1,32	0,64	1,40	0,96	1,16
	60-80	2,32	0,34	1,40	0,60	2,01	0,76	1,39	0,68	1,06
	80-100	3,54	0,72	2,55	0,51	2,82	0,74	1,80	2,04	1,88
	Moyenne	2,55	0,97	1,82	0,60	1,36	0,79	1,53	1,32	1,43
Luzerne	0-20	3,56	2,47	3,10	0,91	2,71	1,51	3,24	6,71	4,69
	20-40	2,40	0,37	1,13	0,87	6,63	2,05	2,10	2,46	2,33
	40-60	3,37	0,85	2,23	0,81	10,58	2,49	2,73	8,96	5,54
	60-80	3,52	0,75	2,08	0,88	5,03	1,65	3,10	3,75	3,44
	80-100	2,91	1,13	2,18	0,97	4,59	1,74	2,83	5,19	3,79
	Moyenne	3,06	0,84	1,91	0,89	5,33	1,89	2,71	4,47	3,62
Betterave	0-20	1,97	2,41	2,11	0,55	1,70	0,97	1,09	4,09	2,03
	20-40	1,44	1,42	1,43	0,95	2,31	1,45	1,37	3,29	2,08
	40-60	1,49	0,84	1,31	1,00	5,99	1,92	1,49	5,04	2,51
	60-80	1,85	0,79	1,44	0,90	6,01	2,00	1,66	4,77	2,88
	80-100	1,08	0,43	0,78	1,12	4,07	1,87	1,21	1,75	1,46
	Moyenne	1,55	1,10	1,38	0,86	3,06	1,51	1,33	3,35	2,09
Jachère	0-20	2,55	2,44	2,50	0,35	1,58	0,87	0,90	3,85	2,17
	20-40	2,19	0,96	1,65	0,40	2,57	0,96	0,88	2,47	1,58
	40-60	2,36	0,55	1,38	0,51	3,33	1,13	1,21	1,83	1,55
	60-80	2,82	0,81	1,99	0,31	5,22	1,14	0,89	4,25	2,27
	80-100	1,77	0,35	1,05	0,50	10,93	2,29	0,89	3,85	2,40
	Moyenne	2,34	0,98	1,71	0,40	3,26	1,17	0,94	3,19	1,99
Cultures marachères	0-20				0,62	4,65	2,61	0,62	4,65	2,61
	20-40				0,48	2,91	1,41	0,48	2,91	1,41
	40-60				0,54	1,44	0,95	0,54	1,44	0,95
	60-80				0,65	2,26	1,31	0,65	2,26	1,31
	80-100				0,84	0,97	0,91	0,84	0,97	0,91
	Moyenne			0,62	2,48	1,47	0,62	2,48	1,47	

N1 = Teneur en azote minéral du sol à la récolte (NMR) : 3 juin 1997

N2 = Teneur en azote minéral du sol à la fin de l'été : 9 septembre 1997

N3 = Teneur en azote minéral du sol après les premières pluies automnales : 1^{er} octobre 1997

Tableau 4 - Azote minéral accumulé dans le sol par l'effet « flush » pour les différents précédents culturaux par rapport à l'azote total et à l'indice de minéralisation du sol.
Table 4 - Accumulated mineral nitrogen for different previous crops in relation to soil total nitrogen and mineralization index.

Reliquat	Profondeur	N3 mg/kg	N2 mg/kg	N tot %	N _{WB} mg/kg	Naut mg/kg	Naut/N tot	Naut/N _{WB}
Céréales	0-20	33,87 (13,55)	36,12 (6,06)	0,144 (0,040)	62,36 (12,02)	-1,76 (12,02)	-0,12	-10,43
	20-40	21,37 (7,58)	26,26 (12,48)	0,117 (0,023)	40,69 (11,23)	-4,95 (11,23)	-0,42	-15,99
	40-60	18,69 (7,86)	29,04 (7,78)	0,052 (0,015)	20,58 (3,60)	-9,24 (3,60)	-1,77	-31,61
	60-80	17,29 (3,62)	22,89 (3,84)	0,043 (0,013)	0,043 (0,013)	-4,70 (0,013)	-1,08	
	80-100	21,38 (9,92)	28,92 (10,63)	0,026 (0,018)	0,026 (0,018)	-11,87 (0,018)	-4,51	
	Moyenne	22,52	28,65	0,08	41,21	-6,51	-0,85	-15,79
Luzerne	0-20	38,99 (14,60)	25,82 (6,61)	0,139 (0,033)	53,95 (13,60)	13,18 (13,60)	0,95	36,28
	20-40	50,15 (41,49)	24,41 (4,34)	0,092 (0,029)	33,39 (13,37)	25,74 (13,37)	2,79	58,63
	40-60	54,94 (27,80)	22,10 (2,47)	0,043 (0,005)	11,94 (9,06)	32,84 (9,06)	7,59	164,01
	60-80	31,55 (24,17)	19,07 (6,43)	0,035 (0,003)	0,035 (0,003)	12,47 (0,003)	3,62	
	80-100	32,15 (24,75)	18,51 (1,79)	0,024 (0,009)	0,024 (0,009)	13,64 (0,009)	5,80	
	Moyenne	41,56	21,98	0,07	33,09	19,58	2,94	59,15
Betterave	0-20	37,93 (8,02)	39,29 (9,96)	0,136 (0,006)	64,86 (20,98)	-1,36 (20,98)	-0,10	19,08
	20-40	37,56 (1,43)	25,84 (6,74)	0,088 (0,020)	38,09 (19,06)	11,72 (19,06)	1,33	32,50
	40-60	35,26 (6,48)	18,36 (5,85)	0,056 (0,019)	16,57 (12,27)	16,89 (12,27)	3,02	74,69
	60-80	36,65 (5,05)	18,29 (2,50)	0,043 (0,011)	0,043 (0,011)	18,36 (0,011)	4,27	
	80-100	35,05 (0,54)	18,78 (5,22)	0,032 (0,012)	0,032 (0,012)	16,27 (0,012)	5,03	
	Moyenne	36,49	24,11	0,07	39,84	12,38	1,74	31,07
Jachère	0-20	36,55 (16,90)	42,18 (8,31)	0,130 (0,013)	40,25 (15,20)	-5,02 (15,20)	-0,43	11,94
	20-40	28,99 (4,96)	30,34 (11,49)	0,094 (0,014)	34,40 (13,47)	-1,35 (13,47)	-0,14	13,97
	40-60	24,76 (4,13)	22,01 (12,79)	0,073 (0,002)	17,16 (5,55)	2,75 (5,55)	0,37	27,99
	60-80	35,30 (2,58)	30,88 (23,54)	0,054 (0,000)	0,054 (0,000)	4,42 (0,000)	0,82	
	80-100	42,31 (6,18)	18,49 (7,66)	0,049 (0,000)	0,049 (0,000)	23,83 (0,000)	4,86	
	Moyenne	33,58	28,78	0,08	30,60	4,80	0,60	15,70
Cultures maraîchères	0-20	92,93 (41,41)	35,56 (7,94)	0,126 (0,019)	40,10 (20,37)	57,37 (20,37)	4,54	37,17
	20-40	46,17 (8,15)	32,69 (12,16)	0,097 (0,023)	28,48 (8,89)	13,48 (8,89)	1,40	52,33
	40-60	29,08 (4,46)	30,62 (14,35)	0,069 (0,007)	14,04 (6,33)	-1,54 (6,33)	-0,22	106,19
	60-80	35,47 (14,11)	27,15 (9,01)	0,055 (0,002)	0,055 (0,002)	8,32 (0,002)	1,52	
	80-100	30,12 (5,36)	33,22 (15,84)	0,046 (0,005)	0,046 (0,005)	-3,10 (0,005)	-0,67	

N2 = Teneur en azote minéral du sol à la fin de l'été : (9 septembre 1997)

N3 = Teneur en azote minéral du sol après les premières pluies automnales : (1^{er} octobre 1997)

Naut = N3 - N2 (N accumulé dans le sol au début de l'automne)

N tot = Teneur en azote total du sol

NWB = Indice de minéralisation anaérobie du sol

Tableau 5 - Quantités d'azote et de carbone présents dans les résidus de récolte.
Table 5 - Nitrogen and carbon quantities present in the crop residues.

Cultures	Nombre de placettes (*)	MS kg/ha	N %	C %	C/N	N kg/ha	C kg/ha
Céréales	6	690,68 (160,00)	0,46 (0,13)	38,52 (3,18)	91,20 (30,36)	3,00 (0,31)	269,89 (86,50)
Luzerne	6	126,73 (33,32)	1,24 (0,28)	35,27 (3,10)	29,75 (7,30)	1,64 (0,77)	44,59 (11,20)
Betterave	6	2022,22 (478,64)	1,71 (0,30)	26,20 (2,01)	15,74 (3,01)	35,22 (12,83)	525,73 (102,58)
Cultures maraîchères	6	837,52 (258,01)	1,11 (0,15)	24,14 (1,63)	22,18 (4,04)	9,44 (3,48)	201,81 (64,09)

MS = Matière sèche

(*) = Pour chaque précédent cultural, les prélèvements des résidus de récolte ont été effectués dans trois parcelles différentes à raison de 2 placettes de 1 m² chacune par parcelle.

soit une diminution globale du stock de N minéral dans la couche 0-100 cm de 6,51 mg/kg soit 148 kg N/ha par rapport au stock obtenu à la fin de l'été (tableau 4). Cette perte serait due à l'effet d'immobilisation de N minéral liée aux résidus de récolte à C/N élevé. Les résidus du blé ont en effet un rapport C/N de 91 (tableau 5). La décomposition de ces résidus dans le champ permet, à court terme, de réduire la disponibilité en azote dans le sol (Pilbeam *et al.*, 1998). Les travaux de Decau *et al.* (1993) ont montré qu'en monoculture de maïs 40 % de NMR est immobilisé après incorporation de 11,6 t/ha de résidus de maïs ayant un rapport C/N de 63. Il en est résulté une réduction nette des nitrates dans les eaux de drainage. Des études en laboratoire de décomposition des résidus de récolte du blé ont montré que l'immobilisation de l'azote reste temporaire. Elle est maximale pendant les premiers stades de pourriture (0-14 jours), la minéralisation nette ne devient, cependant, positive que pendant les derniers stades (90-150 jours) (Cookson *et al.*, 1998). Des résultats similaires ont été obtenus après incorporation au sol des résidus de blé, maïs et soja à C/N variant de 39 à 82 (Aulakh *et al.*, 1991).

L'enfouissement des résidus à C/N élevé pourrait donc être considéré comme un moyen de contrôle de la pollution nitrrique des eaux souterraines si la reprise des phénomènes de transfert des nitrates coïncidait avec l'immobilisation maximale de l'azote (Lacroix, 1995). Ainsi, lorsque de fortes pluies surgissent en début d'automne alors que les sols sont encore nus, cette pratique permettrait d'immobiliser une partie du NMR et diminuer ainsi le flux des nitrates vers la nappe.

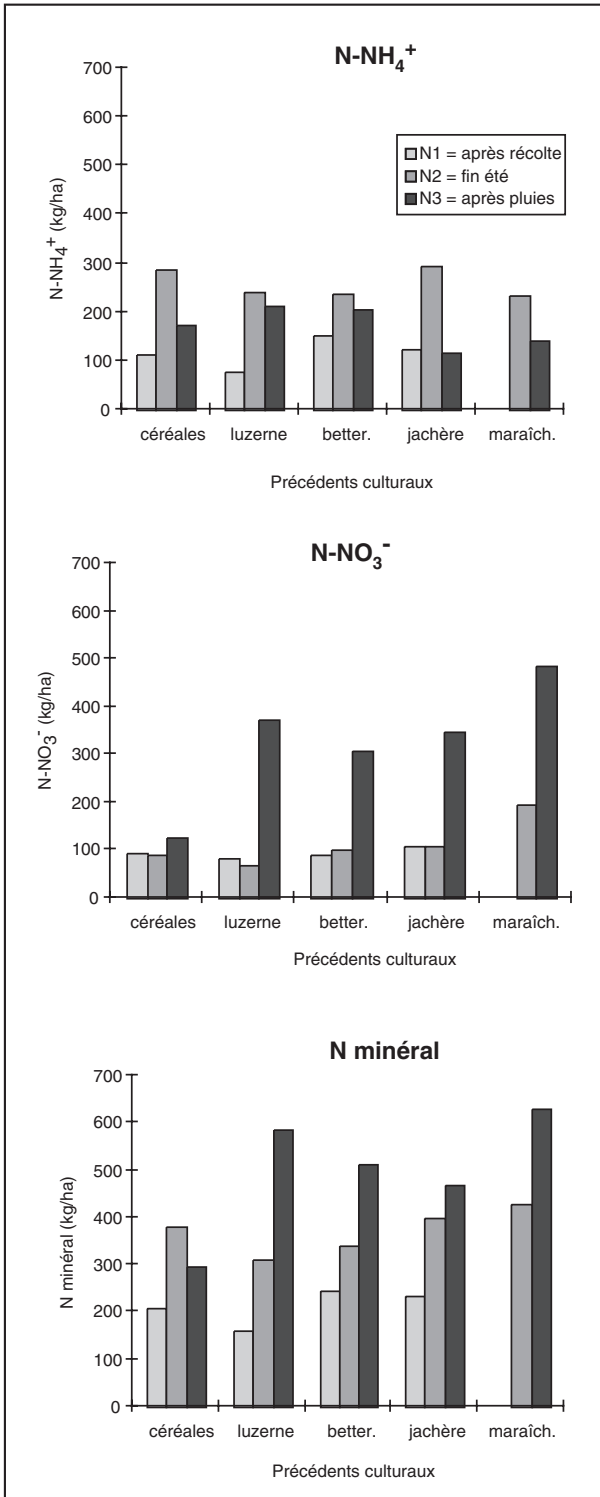
L'analyse du stock en N minéral nitrrique et ammoniacal dans la couche 0-100 cm évalué à la récolte, à la fin de l'été et après les premières pluies (figure 2) permet de faire ressortir la tendance d'évolution du NMR dans le sol. Cette tendance est caractérisée par une ammonification active et une nitrification ralentie pendant l'été puis une minéralisation intense et une reprise de la nitrification dès le retour des pluies automnales, pour tous les précédents culturaux sauf pour les céréales, donnant lieu en début de campagne agricole, à un stock de N minéral dans la couche 0-100 cm de 299, 586, 514, 467 et 631 kg/ha respectivement pour les céréales, la luzerne, la betterave à sucre, la jachère et les cultures maraîchères (tableau 6).

Dans ce stock, les quantités de N-NO₃⁻ sont évaluées à 125, 373, 309, 349 et 487 kg/ha respectivement pour les mêmes précédents culturaux, soit une prédominance de la forme nitrrique de 64 % à 77 % susceptible d'être lixiviee en profondeur en cas de fortes pluies. Le risque de pollution de la nappe par les nitrates est donc plus grave lorsque le précédent cultural est une culture maraîchère ; viennent ensuite la luzerne, la jachère et la betterave à sucre. Par contre, pour les céréales ce risque est atténué de 247 % à 389 % par le phénomène d'immobilisation.

Par ailleurs, pour le raisonnement de la fertilisation azotée des cultures, seul le stock de N minéral dans la couche 0-20 cm ou éventuellement 0-40 cm serait à prendre en considération étant donnée la faible profondeur de la couche explorée par les racines en début de culture. Ce stock varie entre 250 et 90 kg/ha pour la couche 0-

Figure 2 - Evolution moyenne au cours de l'été de l'azote minéral dans la couche 0-100 cm du sol pour différents précédents culturaux.

Figure 2 - Mineral Nitrogen evolution during summer within the soil layer up to 100 cm for different previous crops.



20 cm et entre 375 et 146 kg/ha pour la couche 0-40 cm (tableau 6). Les précédents culturaux sont classés suivant la quantité en N minéral dans ces couches comme suit : cultures maraichères > luzerne > betterave à sucre > jachère > céréales. Ces résultats montrent que les quantités d'azote se trouvant dans le sol au semis dépassent de loin les besoins des cultures à ce stade de croissance, ce qui remet en cause l'apport d'engrais azoté au semis pratiqué par les agriculteurs de cette région.

Après semis, le devenir de ce stock important d'azote minéral dans le sol serait fonction de la pluviométrie et de la pratique de l'irrigation. En cas de fortes pluies ou d'application de doses excessives d'eau d'irrigation, une part de ce stock, sous forme nitrique, suivrait inévitablement le mouvement de l'eau et contribuerait à la pollution nitrique des eaux souterraines. Par ailleurs, la quantité de nitrate lixivié, au cours du cycle cultural, dépend du NMR du sol de la culture précédente et de son évolution pendant l'interculture (Naut), de la fertilisation azotée minérale et organique, de la minéralisation de la matière organique native du sol et des résidus de récolte. Elle dépend également de la lame d'eau infiltrée, de l'occupation du sol et des exportations de la culture en azote. De même, tous ces facteurs influencent le NMR de la culture suivante.

Le suivi de la dynamique de l'azote minéral dans le sol après semis et l'évaluation de la lixiviation des nitrates au-delà de la zone racinaire au cours d'une campagne agricole pour les principales cultures s'avèrent nécessaires pour une meilleure connaissance et une meilleure gestion du cycle de l'azote dans le système sol - plante.

CONCLUSION

La fertilisation azotée telle qu'elle est pratiquée par les agriculteurs dans le périmètre du Tadla et le fort pouvoir de minéralisation des sols laissent des quantités importantes de NMR dans le sol après récolte des principales cultures. Ces quantités évoluent pendant l'été grâce au processus d'ammonification qui se produit en dépit des faibles humidités donnant lieu à une libération importante de N-NH₄⁺ dans le sol. Cette accumulation de N minéral peut être amplifiée par le phénomène de remontée capillaire susceptible de véhiculer les nitrates vers les couches superficielles du sol. Après pluie, la reprise de la minéralisation permet de multiplier le stock en NMR par un facteur variant de 1,5 à 3,6 suivant les précédents culturaux. Ces quantités d'azote minéral dans le sol essentiellement sous forme nitrique, constituent en début de campagne agricole un risque potentiel de pollution de la nappe par les nitrates. Elles seront en effet, sujettes à l'effet de l'irrigation et des pluies à un moment où les sols sont encore nus et où les besoins en azote des cultures nouvellement installées sont encore faibles. Cet effet est accentué par la pratique courante des agriculteurs dans cette région et qui consiste à apporter, quel que soit le précédent cultural, une dose d'engrais azoté au semis des cultures.

Le risque de lixiviation des nitrates en début d'automne est maximal pour le précédent cultures maraichères, et minimal pour le

Tableau 6 - Quantités d'azote ammoniacal, nitrique et minéral dans trois couches du sol en début de campagne agricole pour différents précédents culturaux.

Table 6 - Ammonium, nitrate and mineral nitrogen amounts in three soil layers at the beginning of the cropping season for different previous crops.

Précédent cultural	Profondeurs cm	N-NH ₄ ⁺ Kg/ha		N-NO ₃ ⁻ Kg/ha		N minéral Kg/ha	
Céréales	0-20	48	(15)	42	(30)	90	(36)
	0-40	79	(21)	68	(27)	147	(42)
	0-100	174	(40)	126	(32)	300	(45)
Luzerne	0-20	44	(15)	66	(43)	110	(41)
	0-40	92	(23)	159	(140)	251	(156)
	0-100	212	(82)	373	(289)	586	(347)
Betterave	0-20	39	(8)	68	(23)	107	(23)
	0-40	83	(9)	130	(29)	213	(25)
	0-100	205	(65)	309	(48)	515	(111)
Jachère	0-20	24	(6)	77	(48)	102	(47)
	0-40	49	(10)	133	(56)	182	(54)
	0-100	118	(38)	349	(104)	467	(135)
Cultures maraîchères	0-20	30	(4)	221	(110)	251	(112)
	0-40	56	(4)	319	(116)	376	(116)
	0-100	144	(40)	488	(71)	631	(75)

précédent céréales grâce au phénomène d'organisation microbienne lié aux résidus de récolte à C/N élevé. La lixiviation des nitrates pendant la période pluvieuse (automne et hiver) mériterait d'être quantifiée pour les principales cultures en vue d'approcher le devenir de l'azote minéral présent dans le sol au semis ainsi que celui fourni par le sol au cours du cycle cultural.

Pour prévenir le problème de lixiviation des nitrates dans cette région, il est important de développer une nouvelle stratégie de la fertilisation azotée qui tiendrait compte des spécificités de la région et qui permettrait d'obtenir de bons rendements sans dégrader la qualité des eaux souterraines. Le taux de minéralisation de l'azote organique du sol au cours d'une saison de croissance, ainsi que le niveau de rendement recherché devraient être inclus dans la fertilisation azotée recommandée établie par la méthode du bilan prévisionnel (Hébert, 1969 et Rémy, 1981 citée dans Lacroix (1994)).

Celle-ci nécessite également d'être révisée en vue d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote et de réduire le NMR à un niveau acceptable (Karlen *et al.*, 1998).

C'est ainsi qu'un programme d'utilisation rationnelle des engrais azotés a été développé par des essais de démonstration chez les agriculteurs. Il a pour objectif de réduire les apports excessifs en azote pour le blé et la betterave à sucre (Moughli et Parish, 1996; Moughli, 1997, 1998). En effet, la réduction des doses d'engrais azotés de 31 kg N/ha pour le blé et de 96 kg N/ha pour la betterave à sucre pendant la campagne 1997/98 par rapport à l'année de référence 1995/96 n'a pas entraîné de diminution dans la production des deux cultures. Ce programme de réduction de la dose d'engrais recommandée qui a concerné les cultures les plus répandues dans le périmètre : le blé et la betterave à sucre, se poursuit pour rationaliser la fertilisation azotée en terme de dose, de fractionnement

et de moment d'apport. Il nécessite certes d'être généralisé à l'ensemble des cultures pratiquées dans la région et notamment les cultures maraîchères qui génèrent des excès élevés d'azote.

Des mesures complémentaires peuvent également être préconisées : encourager le semis précoce qui permettrait la consommation de NMR par les cultures ; éviter l'apport azoté au semis ; gérer rationnellement les résidus de récolte et les successions culturales et maîtriser les irrigations. L'adoption de telles mesures dans une zone de maraîchage en Allemagne a permis de réduire le NMR de 240 à 60 kg N-NO₃⁻ et la teneur en nitrates de la solution du sol au-delà de la zone racinaire de 200 à 100 mg NO₃⁻/litre en 3 ans (Wehrmann *et al.*, 1989). L'utilisation de modèles de simulation permettrait également de tester toutes ces mesures à travers une analyse de scénarios et d'identifier leurs effets sur l'environnement. Enfin le contrôle de la pollution des eaux souterraines par les nitrates ne pourrait se concevoir sans un programme d'éducation et de sensibilisation des agriculteurs et de vulgarisation de pratiques culturales adéquates permettant d'obtenir de bons rendements tout en respectant l'état de l'environnement.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement le personnel du Laboratoire de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla et en particuliers Mme Cherkaoui F.Z. pour l'aide qu'ils nous ont apporté pour la réalisation de ce travail. Nos remerciements s'adressent également à M. Badraoui M. de l'IAV Hll et M. Larhrafi M. du SEEN.

BIBLIOGRAPHIE

- Aghzar N., Berdai H., Bellouti A. et Soudi B., encours de publication - Diagnostic et causes de la pollution nitrique des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla (Maroc).
- Aulakh M.S., Doran J.W., Walters D.T., Mosier A.R. and Francis D.D., 1991 - Crop residue type and placement effects on denitrification and mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55 : 1020-1025.
- Boman R.K., Westerman R.L., Raun W.R. and Jojola M.E., 1995 - Time of nitrogen application : effects on winter wheat and residual soil nitrate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59 : 1364-1369.
- Boman R.K., Westerman R.L., Raun W.R. and Jojola M.E., 1995 - Spring-applied nitrogen fertilizer influence on winter wheat and residual soil nitrate. *Journal of Production Agriculture*. 8 (4) : 584-589.
- Cookson W.R., Beare M.M. and Wilson P.E., 1998 - Effects of prior crop residue management on microbial properties and crop residue decomposition. *Applied Soil Ecology* 7(2) : 179-188.
- Corbeels M., Hofman G. and Van Cleemput O., 1999 - Soil mineral nitrogen dynamics under bare fallow and wheat in vertisol of semi-arid Mediterranean Morocco. *Biology & Fertility of soils*. 28(3) : 321-328.
- Decau J., Pujol B. and Pradalie M., 1993 - Use of the mineral nitrogen immobilization capacity of microorganisms to reduce nitrate leaching in maize monoculture. *Compte Rendus de l'Académie des sciences, Série 3, Sciences de la vie*, 316 : 5, 447-450.
- Deluca T.H., Keeney D.R. and Mc Carty G.W., 1992 - Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen. *Biol. Fertil. Soils* 14 : 116-120.
- Données ORMVAT - Données de l'occupation du sol par centre de développement agricole (campagne 1995-1996) du périmètre irrigué du Tadla, Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla.
- Follett R.F., Shaffer M.J., Brodahl M.K. and Reichman G.A., 1994 - NLEAP simulation of residual soil nitrate for irrigated and non irrigated corn. *J. Soil and Water cons.* 49(4) 375-382.
- Goderya F.S., Dahab M.F., Woldt W.E. and Bogardi I., 1998 - Environmental impact evaluation of spatial management practices using simulations with spatial data. *J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE*. 124 (4) : 181-191.
- Harrus H. and Fahner D., 1987 - Influence of nitrogen fertilization on the contamination of soil water with nitrate. Protection of water quality from harmful emissions with special regard to nitrate and heavy metals. *Proceeding of the 5th International Symposium of CIEC*, 97-104.
- Hofman G. and Verdegem L., 1990 - Nitrate migration and drainage losses in arable cropping systems under a temperate marine climate. *International commission on Irrigation and Drainage, Fourteenth Congress, Rio de Janeiro (Bresil)*.
- Honeycutt C.W., Potaro L.J., Avila K.L. and Halteman W.A., 1993 - Residue quality, loading rate and soil temperature relations with hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) residue carbon, nitrogen and phosphorus mineralization. *Biological Agriculture and Horticulture*, Vol. 9. pp. 181-199, 0144-8765/93 \$10, A B Academic Publishers, Printed in Great Britain.
- Johnson P.A., Seeney F. and Williams D., 1996 - The effect of physiological age and planting date on the response of potatoes to applied nitrogen and on levels of residual nitrogen post harvest. *Potato Res.* 39 (4) : 561-569.
- Karlen D.L., Kramer L.A. and Logsdon S.D., 1998 - Field-Scale nitrogen balances associated with long-term continuous corn production. *Agronomy Journal* 90 (5) : 644-650.
- Katupitiya A., Eisenhaver D.E., Ferguson R.B., Spalding R.F., Roeth F.W. and Bobier M.W., 1997 - Long-Term Tillage and crop rotation effects on residual nitrate in the crop root zone and nitrate accumulation in the intermediate vadose zone. *Transactions of the ASAE* ; 40(5): 1321-1327.
- Keeney D.R. and Follett R.F., 1991 - Managing nitrogen for ground water quality and farm profitability : Overview and introduction. *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. Soil Science Society of America, 677 S. Segoe Rd. Madison, WI 53711, USA.
- Lacroix A., 1994 - Les solutions agronomiques à la pollution azotée. *Courrier de l'environnement de l'INRA-France*, N° 24, pp : 29-41.
- Machet et Mary B., 1990 - Effets des différentes successions culturales sur les risques de lixiviation des nitrates en régions de grandes cultures. *Calvet, R. Ed. Nitrates-Agriculture-Eau*, pp : 395-403. *Symposium International INRA, Paris*.
- Moughli L. et Parish D., 1996 - Development of an action plan to improve farm level fertilizer utilisation as part of a strategy to reduce nitrate infiltration into the ground water. *Tadla Ressources Management Project (608 - 0213 - c - 00 - 4002)*. Report No.43.
- Moughli L., 1997 - Démonstration sur l'amélioration de l'efficacité d'utilisation des engrais azotés au Tadla. *Tadla Ressources Management Project (608 - 0213 - c - 00 - 4002)*. Report No. 65.
- Moughli L., 1998 - Résultats du Programme de réduction des excès d'azote apportés à la betterave à sucre et au blé dans le périmètre irrigué du Tadla (Campagne 1997/98) *Tadla Ressources Management Project (608 - 0213 - c - 00 - 4002)*. Report No.73.
- Neeteson J.-J. and Ehler P.A.I., 1989 - Environmental aspects of applying inorganic fertilizers to sugar beet. *Institut International de recherches betteravières 52e congrès d'hiver, Bruxelles*, 15-16 février.
- Neeteson J.-J., 1994 - Residual soil nitrate after application of nitrogen fertilizers to crops. Reprinted from *Contamination of ground waters*. Edited by Adriano D.C., Iskandar A.K. et Murarka I.P., Science Reviews, Northwood.
- Németh T., 1994 - Nitrate- N accumulation in the soil profiles of long-term fertilizer experiments. *AGROKEMIA ES TALAJTAN*, Tom. 43 ; N° 1-2.

- Pilbeam C.J., Wood M., Harris H.C. and Tuladhar J., 1998 - Productivity and nitrogen use of three different wheat-based rotations in NorthWest Syria. *Australian journal of Agricultural research* ; 49(3): 451-458.
- Soudi B., 1988 - Etude de la dynamique de l'azote dans les sols marocains : caractérisation et pouvoir minéralisateur. Thèse de Doctorat es- Sciences Agronomiques, IAV. Hassan II, Rabat, Maroc.
- Soudi B. et Chiang C.N., 1989 - Minéralisation de l'azote dans les sols céréaliers des zones semi-arides du Maroc. Séminaire sur les sols céréaliers, 3-5 oct, Tiarret, Algérie.
- Soudi B., Sbai A. and Chiang C.N., 1990a - Nitrogen mineralization in semi arid area of Morocco: Rate constant variation with depth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 756-761.
- Soudi B., Chiang C.N. et Zeraoui M., 1990b - Variations saisonnières de l'azote minéral et effet combiné de la température et de l'humidité du sol sur la minéralisation. *Actes Ins. Agron. Vet.* ; Vol. 10(1), 29-38.
- Tompson C.A. and Witney D.A., 1998 - Long-term tillage and nitrogen fertilization in a west central Great plains wheat-sorghum-fallow rotation. *J. Prod. Agric.* 11(3): 353-359.
- Van den Boogaard R. and Thorup-Kristensen K., 1997 - Effects of nitrogen fertilisation on growth and soil nitrogen depletion in cauliflower. *Acta Agric. Scand. Sect. B-Soil Plant Sci.* 47 (3) : 149-155.
- Warncke D.D., 1996 - Soil and plant tissue testing for nitrogen management in carrots. *Communications in Soil Science & Plant Analysis.* 27 (3-4) : 597-605.
- Wehrmann J., Scharpf H.C., Welte E. and Szabolcs I., 1989 - Reduction of nitrate leaching in a vegetable farm-fertilisation, crop rotation, plant residues. Protection of water quality from harmful emissions with special regard to nitrate and heavy metals. *Proceeding of the 5 the International symposium of CIEC*, 247-253.
- Westfall D.G., Havlin J.-L., Hergert G.W. and Raun W.R., 1996 - Nitrogen management in dryland cropping systems. *J. Prod. Agric.* 9(2): 192-199.
- Zebarth B.J., Paul J.W., Schmidt O. and McDougall R., 1996 - Influence of the time and rate of liquid manure application on yield and nitrogen utilization of silage corn in south coastal British Columbia. *Canadian Journal of soil Science.* 76 (2) : 153-164.
- Zhou X.M., Maskenzie A.F., Madramootoo C.A., Kaluli J.W. and Smith D.L., 1997 - Management practices to conserve soil nitrate in maize production systems. *Journal of Environmental Quality.* 26(5): 1369-1374.

