

# Détermination de l'ammonium non échangeable des sols du Tadla (Maroc) : Potentiel et évolution

H. Berdai<sup>(1)</sup>, B. Soudi<sup>(2)</sup>, M. Badraoui<sup>(2)</sup> et A. Bellouti<sup>(3)</sup>

- (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, Rabat, Maroc
- (2) Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc
- (3) Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla., Maroc

## RÉSUMÉ

L'ammonium non échangeable du sol pourrait constituer une composante significative du cycle de l'azote et participer activement à la nutrition des plantes. La connaissance des teneurs des sols en  $N-NH_4^+$  non échangeable et la capacité de fixation et de libération de cette forme d'azote au cours des cycles culturaux est nécessaire pour développer, à long terme, des programmes de fertilisation azotée des cultures et préserver la qualité nitrique des ressources en eau souterraine.

Des investigations ont été réalisées dans le périmètre irrigué du Tadla en vue de déterminer les teneurs des sols en  $N-NH_4^+$  non échangeable et leur évolution à quatre dates successives pour différentes cultures et différentes pratiques de fertilisation.

Les sols du Tadla présentent une teneur appréciable en  $N-NH_4^+$  non échangeable qui varie en fonction du type de sol. Parmi les caractéristiques du sol analysées, la teneur en argile explique 94 % de la variation de la teneur des sols en  $N-NH_4^+$  non échangeable.

Cette teneur est sujette à des variations considérables au cours et après les différents cycles culturaux. Dans certains cas, le  $N-NH_4^+$  non échangeable n'a pas été sollicité, soit à cause d'absence de plantes ou en raison d'une fertilisation azotée excessive. Par contre, le  $N-NH_4^+$  non échangeable pourrait être fortement sollicité par une culture dérobée non fertilisée. Mais, aucune tendance d'évolution claire et bien définie n'a été mise en évidence, montrant ainsi que le mécanisme de fixation et de libération de  $NH_4^+$  non échangeable est très complexe. En revanche, ce processus important dans les sols du Tadla aurait un impact bénéfique sur le renouvellement et la disponibilité pour les plantes de l'azote du sol. L'étude de ce processus pour les différents systèmes de culture en relation avec les conditions écologiques et son intégration dans les modèles de simulation d'azote pourrait contribuer à une meilleure connaissance du statut de fertilité azotée de ces types de sols et permettrait une gestion rationnelle de l'azote dans le système eau-sol-plante.

## Mots clés

$N-NH_4^+$  non échangeable, potentiel, évolution, fixation, libération, teneur en argile, nitrification, ammonification.

**SUMMARY****DETERMINATION OF NON EXCHANGEABLE SOIL AMMONIUM IN TADLA AREA (MOROCCO): Potential and evolution**

Non exchangeable ammonium could be a significant component of soil N and contributes to crop nutrition to a remarkable extent. The knowledge of non exchangeable ammonium content and soil  $\text{NH}_4^+$  fixing and release capacities during the crop cycles are necessary to develop long-term nitrogen fertilizer programs and to preserve the groundwater quality.

Representative soils located in the Tadla irrigated area were investigated for their contents of non exchangeable ammonium and its evolution at four successive dates for different crops and fertilization practices.

The Tadla soils have high contents of non exchangeable ammonium which vary as a function of soil type. Among the analysed soil characteristics, the clay content explain 94 % of the non exchangeable soil  $\text{NH}_4^+$ -N variation.

Non exchangeable soil ammonium contents were subjected to considerable changes during and after the growing seasons. In some cases, non exchangeable  $\text{NH}_4^+$ -N was not mobilized either in the non-planted soil or in the highly N fertilized plots. On the other hand, it could be highly mobilized by a non N fertilized intermediate crop. But, no clearly defined evolution trend of non exchangeable  $\text{NH}_4^+$ -N was underlined, suggesting a complexity of the ammonium fixation and release mechanism. In return, this important process in Tadla soils could have a beneficial effect on soil nitrogen turnover and availability for crops. Additional studies of this process for different cultural systems related to ecologic conditions and its integration in N models may contribute to better understand N fertility status of this soils and allow a rational nitrogen management of the water-soil-crop system.

**Key-words**

Non exchangeable  $\text{NH}_4^+$ -N, potential, evolution, fixation, release, soil clay content, nitrification, ammonification.

**RESUMEN****DETERMINACIÓN DEL AMONIO NON INTERCAMBIABLE DE LOS SUELOS DE TADLA (MARRUECOS) Potencial y evolución**

El amonio no intercambiable del suelo podría constituir un componente del ciclo del nitrógeno y participar activamente a la nutrición de las plantas. El conocimiento de los contenidos de los suelos en  $\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable y de la capacidad de fijación y de liberación de esta forma de nitrógeno en el curso de los ciclos de cultivos es necesario para desarrollar, a largo plazo, programas de fertilización nitrogenada de los cultivos y preservar la cualidad nitríca de los recursos en agua subterráneas.

Investigaciones fueron realizadas en el perímetro irrigado del Tadla para determinar los contenidos de los suelos en  $\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable y su evolución en cuatro fechas sucesivas para diferentes cultivos y diferentes prácticas de fertilización.

Los suelos del Tadla presentan un contenido apreciable en  $\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable que varía en función del tipo de suelo. En las características analizadas del suelo, el contenido en arcilla explica 94 % de la variación del contenido de los suelos en  $\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable.

Este contenido es sujeto a variaciones considerables en el curso y después de los diferentes ciclos de cultivos. En ciertos casos, el  $\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable no fue solicitado, sea por falta de plantas, sea en razón de fertilización nitrogenada excesiva. Al contrario, el  $\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable podría ser totalmente solicitado por un cultivo no fertilizado. Pero, ninguna tendencia de evolución clara y bien definida fue observada lo que muestra que el mecanismo de fijación y de liberación de  $\text{NH}_4^+$  no intercambiable es muy complejo. Al contrario, este proceso importante en los suelos del Tadla tendría un impacto benéfico sobre el abastecimiento y la disponibilidad para las plantas del nitrógeno del suelo. El estudio de este proceso para los diferentes sistemas de cultivo en relación con las condiciones ecológicas y su integración en los modelos de simulación de nitrógeno podría contribuir a un mejor conocimiento del estatuto de la fertilidad nitrogenada de estos tipos de suelos y permitirían una gestión racional del nitrógeno en el sistema agua-suelo-planta.

**Palabras clave**

$\text{N-NH}_4^+$  no intercambiable, potencial, evolución, fijación, liberación, contenido en arcilla,

L'ammonium non échangeable a toujours été négligé dans le raisonnement de la fertilisation azotée des cultures alors qu'il constitue, dans les sols argileux structurés une composante significative du cycle de l'azote (Mengel et Scherer, 1981 ; Scherer et Weimar, 1993). En effet, les argiles de type 2:1 peuvent contenir, dans leur espace inter-feuillets, des quantités appréciables d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) (Scherer, 1982). Cette forme d'azote, fixée sélectivement dans les positions interfoliaires des minéraux argileux, est susceptible d'être libérée, en partie, au cours de la saison de croissance et contribuer à la nutrition des cultures (Mengel *et al.*, 1990 ; Scherer et Ahrens, 1996 ; Scherer et Weimar, 1994).

Lors du processus de fixation, l'ion ammonium diffuse de la solution du sol vers l'espace inter-feuillets des minéraux argileux. La fermeture de cet espace protège l'ion  $\text{NH}_4^+$  des réactions d'échange (Nommik, 1965). La libération de l'ammonium non échangeable consiste en une réaction d'échange qui permet le déplacement de l'ion  $\text{NH}_4^+$  vers la solution du sol suite à l'ouverture de l'espace inter-feuillets des minéraux argileux. Cependant, la diffusion de cet ion en dehors de l'espace inter-feuillets ne peut se produire que lorsque la concentration de  $\text{NH}_4^+$  dans la solution du sol devient inférieure à un certain niveau (Scherer et Zhang, 1999).

Les processus de transformation de l'azote dans le sol pouvant déclencher la libération de l'ammonium non échangeable sont essentiellement la nitrification (Green *et al.*, 1994), les prélèvements d'azote par les cultures (Scherer et Weimar, 1994), l'assimilation de l'azote par la microflore du sol (Scherer et Schneiders, 1995 ; Zhang et Scherer, 2000) et la volatilisation. La fixation de l'ammonium est, par contre, induite par les apports d'engrais ammoniacaux ou organiques (Scherer et Weimar, 1994) et par l'ammonification de la matière organique du sol (Zhang et Scherer, 2000). En général, la fixation de l'ammonium est plus rapide que sa libération ultérieure (Drury et Beauchamp, 1991 ; Kowalenko, 1978). Tout se passe comme si l'ammonium non échangeable était continuellement en équilibre avec l'ammonium soluble et échangeable (Kowalenko et Cameron, 1976 ; Thompson et Blackmer, 1993).

La teneur du sol en  $\text{NH}_4^+$  non échangeable et la capacité de fixation et de libération de cet ion dépendent essentiellement de la teneur en argile du sol (Liang et Mac Kenzie, 1994), et de la nature minéralogique des argiles (Scherer et Ahrens, 1996). Les argiles du type 2:1, à espace inter-feuillets ouvert telles que les smectites et les vermiculites, fixent plus d'ammonium que celles du type 1:1 (kaolinite) ou du type 2:1:1 (chlorite). Néanmoins, cette capacité peut être fortement altérée par la quantité de potassium présente dans le sol sous forme échangeable étant donné que l'ion  $\text{NH}_4^+$  et l'ion  $\text{K}^+$  sont en compétition vis-à-vis des mêmes sites des minéraux argileux (Scherer, 1982, 1986).

La libération de  $\text{NH}_4^+$  non échangeable et sa mobilisation par les cultures peuvent également être conditionnées par la diminution du pH au niveau de la rhizosphère et varier significativement suivant les espèces de plantes cultivées (Scherer et Ahrens, 1996).

Des facteurs supplémentaires gouvernent le processus de fixa-

tion et de libération de  $\text{NH}_4^+$  dans les rizières qui sont caractérisées par deux couches du sol : une aérobie et l'autre anaérobie : le potentiel redox, la réduction ou l'oxydation du fer octaédrique des minéraux argileux et la dynamique des oxydes de fer (Scherer et Zhang, 1999 ; Zhang et Scherer, 1999, 2000). Ces facteurs affectent profondément la capacité d'échange cationique des sols.

Au Maroc, une attention particulière a été portée au  $\text{K}^+$  non échangeable (Badraoui, 1988 ; Badraoui et Bloom, 1989 ; Badraoui *et al.*, 1991 ; 1992 ; 1997), mais quelques études seulement ont été réalisées pour déterminer le  $\text{NH}_4^+$  non échangeable des sols. La dynamique de  $\text{NH}_4^+$  non échangeable dans les sols au cours de différents cycles culturaux, quant à elle, n'a pas encore été étudiée.

Par ailleurs, dans le périmètre irrigué du Tadla, la pollution nitrique des ressources en eau souterraine commence à devenir alarmante en raison des apports excessifs des engrais azotés et de la fourniture naturelle importante d'azote minéral par le sol (Aghzar *et al.*, 2002). Une partie de cet azote pourrait provenir de la libération de  $\text{N-NH}_4^+$  non échangeable, vues la nature argileuse et la dominance des argiles du type 2:1 des sols (Badraoui *et al.*, 1995).

C'est pourquoi que des investigations concernant l'ammonium non échangeable ont été réalisées dans le périmètre irrigué du Tadla. Les objectifs étaient,

d'une part de :

- quantifier le potentiel des sols en  $\text{N-NH}_4^+$  non échangeable et rechercher d'éventuelles corrélations entre  $\text{N-NH}_4^+$  non échangeable et les caractéristiques du sol ;

et d'autre part de :

- suivre l'évolution, à quatre dates successives, de la teneur en  $\text{N-NH}_4^+$  non échangeable pour différents types de sol et différents systèmes de culture.

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

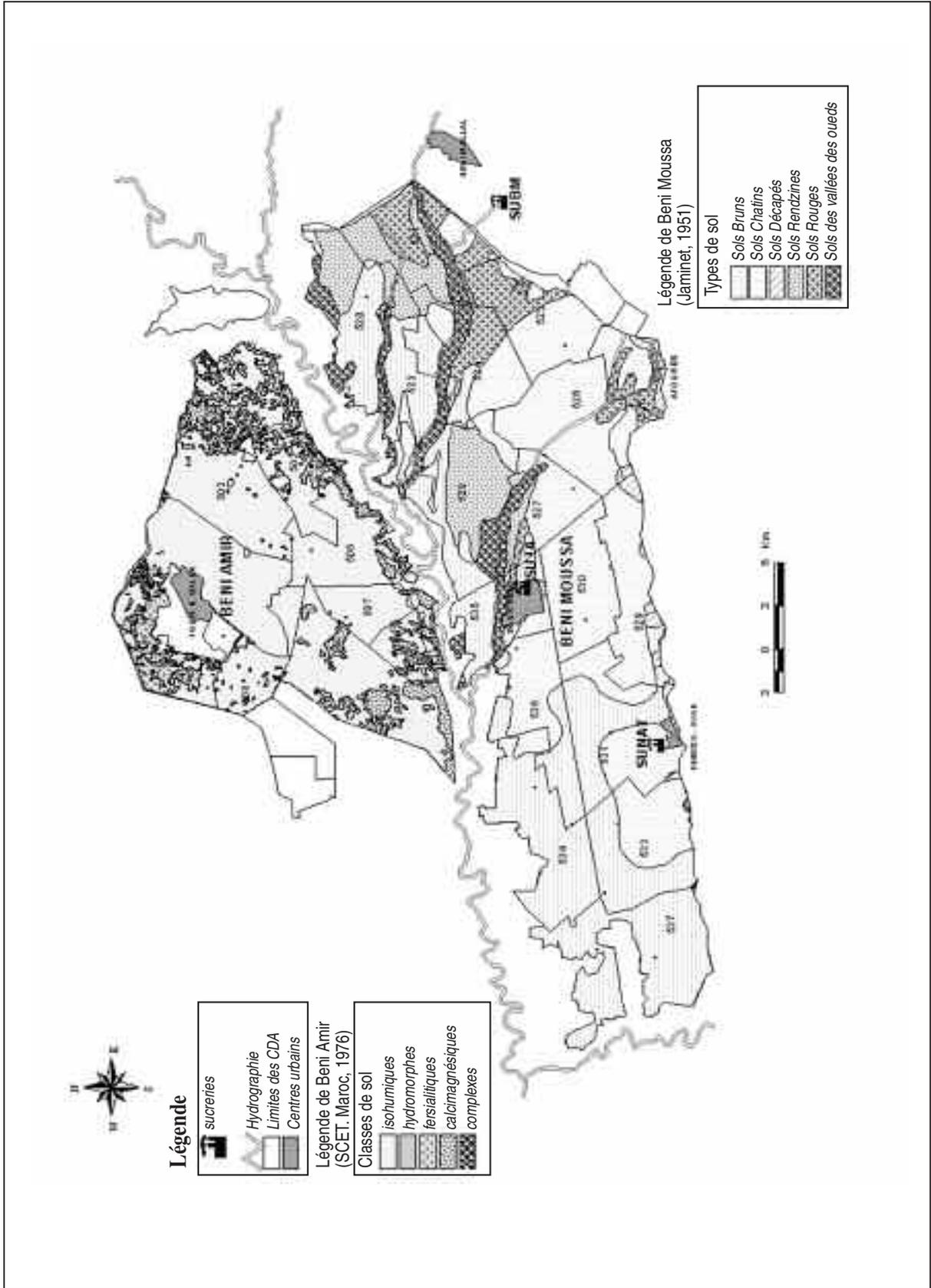
### Présentation de la zone d'étude

La plaine du Tadla se situe dans le bassin de l'Oued Oum Er Rebja 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 du Tadla appartiennent, par ordre d'importance, aux groupes suivants (*figure 1*):

- les sols isohumiques, bruns ou châtaîns subtropicaux, *Kastanozems calciques* (FAO, 1989): Ils sont de loin les plus répandus. Ils se rencontrent au centre de la plaine et couvrent près de 83 % du périmètre irrigué. Ces sols présentent une texture fine ou équilibrée et sont favorables à la mise en valeur agricole sous irrigation ;
- les sols calcimagnésiques bruns calcaires, *Calcisols hapliques*

Figure 1 - Carte pédologique du périmètre irrigué du Tadla  
 Figure 1 - Soil map of Tadla irrigated area



(FAO, 1989) : Ce sont des sols peu profonds, très calcaires, caillouteux mais de texture équilibrée. On les rencontre en particulier le long des Oueds. Ces sols occupent 11 % de la couverture pédologique du périmètre du Tadla ;

- les sols faiblement représentés dans le périmètre sont les sols à sesquioxyle de fer, *Luvisols chromiques* (FAO, 1989) (1 %), les sols hydromorphes, *Gleysols calciques* (FAO, 1989) (1 %) et les sols peu évolués, *Fluvisols calciques* (FAO, 1989) (4 %).

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 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 de 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 1816 mm. Elle est maximale en juillet-août (10 mm/j) et minimal en décembre (1,7 mm/j) (Bouazzama et Bouyahiaoui, 2000).

D'après les données sur l'occupation du sol établies par le Centre de Développement Agricole (ORMVAT, 1996), la céréaliculture prédomine dans la totalité du périmètre (43,5 %). Les autres spéculations concernent principalement la betterave (12,9 %), les cultures maraîchères (13,4 %), la luzerne (11,6 %) et l'arboriculture (olivier et agrumes) (18,6 %), et sont réparties d'une manière différente selon les zones. Les légumineuses sont peu représentées. Les successions culturales pratiquées dans la région sont nombreuses, avec une dominante : la rotation blé-betterave. Parmi les cultures maraîchères pratiquées, citons particulièrement le niora, le sésame et l'oignon. Leurs précédents culturaux sont essentiellement des cultures maraîchères ou des céréales. La luzerne est souvent installée après luzerne ou céréales (Aghzar *et al*, 2002).

## Potentiel des sols en ammonium non échangeable

Des prélèvements de sol ont été effectués en novembre 2000 sur 20 parcelles, représentatives de différentes situations culturales, appartenant au réseau de suivi de la qualité des sols du périmètre irrigué du Tadla. Dans ces parcelles, les trois types de sol (isohumique, calcimagnésique et fersiallitique) et les quatre types de cultures (blé, betterave, luzerne et cultures maraîchères) dominants dans le périmètre irrigué ont été représentés.

Lors des prélèvements du sol, les horizons pédologiques de chaque type de sol ont été respectés. La méthode d'échantillonnage adoptée est celle de l'échantillon composite unique constitué à partir de 4 prélèvements. Les échantillons de sol sont séchés à l'air libre, broyés, tamisés et les analyses suivantes sont réalisées sur la terre fine : la granulométrie (Day, 1956) ; le pH (rapport sol/eau = 1/2,5) ; la capacité d'échange cationique (Chapman, 1965) ; le carbone organique total : (Nelson et Sommers, 1975) ; l'azote total

(Bremner, 1960) ; le potassium échangeable (Knudsen *et al*, 1982) et l'azote minéral : (Keeney et Nelson, 1982).

L'ammonium non échangeable du sol est déterminé par la méthode de Silva et Bremner (1966). Cette méthode est réalisée en deux étapes. La première étape consiste en un pré-traitement à chaud de l'échantillon du sol (1 g < 100 mesh) dans une solution de KBr qui permet d'oxyder la matière organique du sol et d'éliminer l'azote organique sous forme de N<sub>2</sub>. L'ammonium échangeable est ensuite déplacé par une solution de KCl 0,5 N et éliminé dans le surnageant liquide. Cette dernière opération est répétée trois fois. La seconde étape consiste en une digestion des minéraux argileux dans un mélange HF 5N - HCl 1N. L'ammonium ainsi libéré est distillé en présence de KOH 10 N. Le distillat est collecté dans un indicateur mixte à l'acide borique et titré avec une solution de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5.10<sup>-3</sup> N.

Une régression linéaire multiple a été effectuée à l'aide du logiciel STATITCF (1991) pour rechercher parmi les paramètres analysés, ceux qui expliquent au mieux les teneurs des sols en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable.

## Dynamique de l'ammonium non échangeable

Des échantillons de sol ont été prélevés sur 20 autres parcelles appartenant ou avoisinant les parcelles du réseau de suivi de la qualité des sols du périmètre irrigué du Tadla. Ces parcelles, représentatives de différentes situations culturales, étaient occupées par le blé, la betterave, la luzerne ou une culture maraîchère, chacune de ces cultures étant représentée par 5 parcelles différentes. La méthode d'échantillonnage adoptée est celle de l'échantillon composite unique constitué à partir de 3 prélèvements du sol. Ces prélèvements ont été réalisés par couche de 10 cm (pour éviter tout chevauchement entre les horizons pédologiques), sur 1 m de profondeur à quatre dates successives : février, avril, juin et septembre 2001.

Les échantillons de sol, séchés à l'air libre, broyés et tamisés, ont subi les analyses de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable et K<sup>+</sup> échangeable selon les méthodes citées précédemment.

Les dates de semis et de récolte des cultures ainsi que la fertilisation azotée adoptée par les agriculteurs dans les parcelles de suivi ont été déterminées par enquête.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### Potentiel des sols en ammonium non échangeable

Dans le *tableau 1*, les vingt sols échantillonnés sont présentés par ordre croissant suivant leur teneur moyenne sur tout le profil en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable. Le type, la profondeur, la texture et quelques caractéristiques du sol ainsi que la rotation culturale pra-

**Tableau 1** - Rotations culturales, quelques caractéristiques des sols, et leur teneur en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable**Table 1** - Crop rotations, some soil characteristics and their non exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content

Site	Profondeurs	pH eau	Argile %	Texture	CEC (méq/100 g)	Type de sol	Cultures	Précédent cultural	K <sub>2</sub> O échangeable mg K <sub>2</sub> O kg <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> non éch. mg N kg <sup>-1</sup>	Moyenne (*)
50901	0-20	8,2	12,8	LAS	18,00	fersiallitique	luzerne	luzerne	260	59,2	49,2
	20-40	7,3	8,3		16,00				140	21,0	
	40-60	7,4	17,5		13,25				210	67,3	
50702	0-15	7,7	23,0	LA	24,50	fersiallitique	luzerne	luzerne	260	151,0	104,0
	15-45	8,0	29,3		23,75				160	95,6	
	45-100	8,4	33,0		15,25				130	89,8	
50904	0-20	7,9	28,5	LA	17,50	fersiallitique	luzerne	luzerne	280	122,8	104,7
	20-50	7,9	33,3		15,25				190	113,6	
	50-100	8,0	34,3		11,75				120	77,6	
53402	0-20	8,1	34,3	LA	24,00	calcimagnésique	luzerne	luzerne	200	119,7	120,2
	20-40	8,1	35,5		23,25				510	120,7	
50102	0-20	8,6	28,8	LA	25,50	calcimagnésique	luzerne	luzerne	180	116,3	122,2
	20-35	8,6	29,5		25,00				180	128,0	
50501	0-10	6,8	27,3	LAS	19,50	calcimagnésique	luzerne	blé	200	139,0	123,0
	10-30	6,6	28,5		20,00				250	124,8	
	30-40	7,8	28,8		19,00				160	105,3	
53503	0-20	8,0	14,3	LAS	10,50	isohumique	blé	culture maraichère	400	99,2	126,8
	20-50	6,7	20,3		13,50				370	103,2	
	50-70	6,5	29,8		18,25				420	136,1	
	70-100	8,3	39,5		19,25				540	168,5	
50403	0-15	8,5	23,3	LAF	22,75	isohumique	betterave	blé	370	105,4	132,5
	15-60	8,6	28,0		22,75				280	136,2	
	60-80	8,6	29,5		18,00				90	143,9	
52302	0-20	7,9	44,0	A	29,25	isohumique	blé	betterave	820	146,8	137,1
	20-60	7,9	45,8		29,00				540	129,8	
	60-100	8,1	45,8		28,25				350	134,7	
50703	0-15	7,8	32,5	LA	15,25	isohumique	blé	betterave	400	165,2	144,5
	15-40	8,0	32,3		19,25				280	148,4	
	40-70	8,0	32,5		18,00				270	129,4	
53002	0-15	8,1	38,3	A	23,00	isohumique	blé	blé	370	177,0	155,9
	15-60	7,6	38,5		23,00				370	139,6	
	60-100	7,4	43,3		23,00				240	143,5	
50305	0-20	8,3	30,5	AL	23,50	isohumique	luzerne	blé	510	167,4	158,1
	20-60	8,3	34,8		22,50				330	149,8	
	60-100	8,4	37,3		18,75				210	157,0	
52403	0-15	8,1	29,3	LA	20,25	calcimagnésique	blé	betterave	880	156,7	173,3
	15-40	8,3	32,3		17,00				770	242,2	
	40-50	8,3	28,5		15,00				500	124,1	
52802	0-25	7,8	34,3	AL	35,25	isohumique	luzerne	blé	280	172,3	175,0
	25-65	8,2	36,0		34,00				200	137,5	
	65-80	8,1	43,0		36,50				190	231,1	
53001	0-10	7,0	45,5	A	21,75	isohumique	betterave	blé	820	132,2	178,7
	10-30	6,7	47,8		19,00				820	143,1	
	30-70	7,9	51,3		17,00				510	143,6	
	70-100	8,2	53,0		20,50				330	296,0	
50202	0-10	8,3	30,3	LA	27,25	isohumique	blé	betterave	430	156,7	188,6
	10-40	8,3	32,3		26,25				380	164,6	
	40-70	8,4	33,8		26,25				340	231,3	
	70-100	8,4	36,8		19,50				260	202,1	
52501	0-20	8,0	30,8	AL	32,00	isohumique	betterave	blé	560	195,3	198,2
	20-50	8,1	41,8		29,00				300	201,4	
	50-100	8,2	43,0		23,50				210	198,0	
53704	0-20	7,2	34,5	A	23,50	isohumique	blé	culture maraichère	380	180,5	201,0
	20-60	7,2	40,0		21,00				190	197,8	
	60-100	8,4	40,8		17,50				140	224,7	
53602	0-15	8,1	37,3	A	29,00	isohumique	blé	culture maraichère	200	211,6	202,8
	15-60	8,3	39,3		24,25				160	178,4	
	60-100	8,3	42,5		22,00				120	203,9	
52301	0-20	8,1	32,8	A	25,25	isohumique	betterave	blé	340	200,9	211,6
	20-60	7,9	42,5		24,25				190	200,7	
	60-100	8,1	43,8		21,25				120	233,0	

(\*) : Les sols sont classés par ordre croissant suivant leur teneur moyenne en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable. Cette moyenne est calculée par profil pour tous les horizons du sol. texture : LA = limono-argileuse, ALS = argilo-limono-sableuse, AL = argilo-limoneuse, ALF = argilo-limoneuse fine et A = argileuse

tiquée durant les campagnes 2000 et 2001 y sont également présentés.

La teneur moyenne des sols du Tadla en  $N-NH_4^+$  non échangeable varie entre 49 et 212  $mg\ N\ kg^{-1}$ . Les plus faibles valeurs sont observées pour les sols fersiallitiques et varient fortement en fonction de la texture du sol. En effet, la teneur moyenne de  $N-NH_4^+$  non échangeable se situe aux alentours de 100  $mg\ N\ kg^{-1}$  pour les sols fersiallitiques de texture limono-argileuse alors qu'elle ne dépasse guère 49  $mg\ N\ kg^{-1}$  pour le même type de sol mais de texture limono-argilo-sableuse.

En général, les sols les plus riches en  $N-NH_4^+$  non échangeable sont les sols isohumiques. Leur teneur moyenne en  $N-NH_4^+$  non échangeable varie entre 127 et 212  $mg\ N\ kg^{-1}$ . Comme pour les sols fersiallitiques, le sol isohumique à texture équilibrée (limono-argilo-sableuse) présente une teneur en  $N-NH_4^+$  non échangeable plus faible que ceux à texture fine (limono-argileuse ou argilo-limoneuse) et très fine (argileuse).

La majorité des sols calcimagnésiques échantillonnés se situent, selon leur teneur en  $N-NH_4^+$  non échangeable, d'une manière intermédiaire entre les sols fersiallitiques et les sols isohumiques. Leur teneur moyenne en  $N-NH_4^+$  non échangeable est évaluée à environ 120  $mg\ N\ kg^{-1}$  mais peut atteindre des valeurs plus élevées comparables à celles des sols isohumiques (soit 173  $mg\ N\ kg^{-1}$ ).

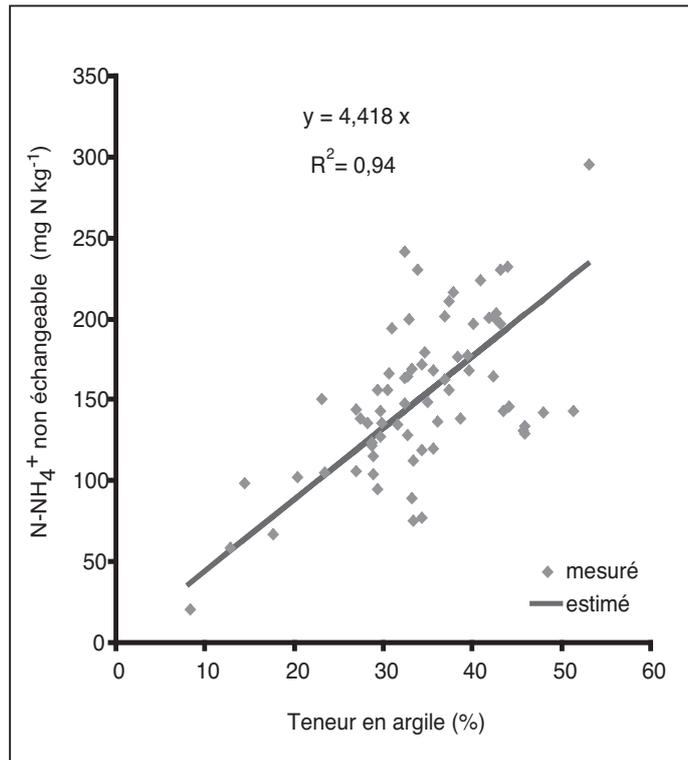
Pour ce qui est de la distribution de  $N-NH_4^+$  non échangeable dans le profil du sol, aucune tendance d'évolution de  $N-NH_4^+$  non échangeable en fonction de la profondeur du sol n'est mise en évidence.

Pour expliquer les teneurs du sol en  $N-NH_4^+$  non échangeable à partir des caractéristiques classiques du sol, une régression linéaire multiple sans terme constant a été réalisée en utilisant, comme variables explicatives : les teneurs en argile (A), en carbone organique total (COT), en azote total kjeldahl (NTK), de  $N-NH_4^+$  échangeable ( $N-NH_4^+$  éch.), de  $K_2O$  échangeable ( $K_2O$  éch.) et de la capacité d'échange cationique (CEC), obtenues sur 70 échantillons.

Il en ressort que seul le coefficient de régression relatif à la teneur en argile est significativement différent de zéro au niveau de probabilité  $\alpha = 0,01$ , montrant ainsi qu'il n'y a pas d'influence réelle des cinq autres paramètres du sol sur la teneur du sol en  $N-NH_4^+$  non échangeable. En effet, la régression linéaire simple, présentée en *figure 2*, explique à elle seule, 94 % de la variation de la teneur du sol en  $N-NH_4^+$  non échangeable. Ce résultat est en accord avec celui obtenu par Soudi *et al.* (1991) pour quelques types de sol appartenant à quatre régions du Maroc où une corrélation faible mais hautement significative ( $R = 0,51^{**}$ ) a été trouvée entre le  $NH_4^+$  non échangeable et la teneur en

**Figure 2** - Relation entre  $N-NH_4^+$  non échangeable et la teneur en argile des sols du Tadla

**Figure 2** - Relationship between the Tadla soil amount of non exchangeable  $NH_4^+-N$  and clay contents



argile. De même, pour trois types de sols contrastés de la région de Hesse en Allemagne (sols alluviaux, sols basaltiques et sols loess), Scherer (1982) a montré l'existence d'une corrélation négative  $R = -0,79$  entre le  $NH_4^+$  non échangeable et le potassium disponible pour les cultures extrait par Electro-Ultrafiltration.

Par ailleurs, la teneur en  $N-NH_4^+$  non échangeable des sols du Tadla pourrait également être expliquée par la nature minéralogique des argiles. En effet, les sols fersiallitiques contiennent beaucoup plus de kaolinite et d'oxydes de fer que de feuillets de silicates de type 2:1, mais l'illite est généralement présente en association avec la kaolinite (Badraoui *et al.*, 1995). Par contre, les sols isohumiques sont dominés par les smectites, l'illite et la palygorskite (Soudi *et al.*, 1991). La vermiculite et les smectites ont une capacité de fixation de  $NH_4^+$ , mais aussi de  $K^+$ , plus importante que celle des autres minéraux argileux (Badraoui, 1988; Scherer et Weimar, 1994; Sowden *et al.*, 1978), ce qui expliquerait, en partie, les faibles teneurs en  $N-NH_4^+$  non échangeable des sols fersiallitiques par rapport aux sols isohumiques.

Une autre raison possible pouvant expliquer les niveaux de  $N-NH_4^+$  non échangeable des sols du Tadla est l'histoire de la fertilisation minérale et organique des cultures pratiquées par les agriculteurs. Les doses d'engrais azotés sont excessives, essentiellement pour la rotation blé-betterave et les cultures maraîchères (Aghzar *et al.*, 2002). Ceci expliquerait en partie la plus

**Tableau 2** - Quantités de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable libérées ou fixées durant la période de suivi pour les différentes parcelles étudiées  
**Table 2** - Amounts of non exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N released or fixed during the monitored period for the different investigated plots

Culture	n° site	Type de sol	Texture	K <sub>2</sub> O échangeable mg kg <sup>-1</sup>	Apport d'azote kg N ha <sup>-1</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> non échangeable du sol mg N kg <sup>-1</sup> fév	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> non échangeable libérées ou fixées dans le profil du sol mg N kg <sup>-1</sup>		
							fév-avril	avril-juin	juin-sept
BLÉ	1	isohumique	LA	420	200	182	-36	-18	3
	2	isohumique	AL	430	115	156	4	-17	-21
	3	isohumique	LAF	540	190	157	12	-41	-11
	4	isohumique	AL	430	160	169	-23	15	-40
	5	calcimagnésique	LA	600	180	190	-25	-8	5
BETTERAVE	6	calcimagnésique	LA	250	325	146	1	15	-17
	7	isohumique	LAS	280	160	127	-1	-35	27
	8	isohumique	A	340	280	160	0	57	-54
	9	isohumique	LA	460	230	115	50	-50	0
	10	isohumique	A	560	140	165	8	51	-49
LUZERNE	11	calcimagnésique	LA	190	77*	111	31	-3	-17
	12	isohumique	AL	420	0	172	-11	31	-76
	13	calcimagnésique	LAS	150	140	109	0	-5	-22
	14	calcimagnésique	LA	310	250	148	-3	-8	13
	15	isohumique	LA	210	210	176	-21	44	-65
CULTURES MARAÎCHÈRES	16	isohumique	LA	600	140	115	32	58	-88
	17	isohumique	A	460	170	176	-29	41	-52
	18	isohumique	LAS	480	335	121	-23	-2	6
	19	isohumique	A	320	320**	160	6	-26	-40
	20	isohumique	A	180	200	162	-13	15	-67

\* : Apports d'azote annuels pour la luzerne

\*\* : Oignon suivi au mois de mai de fourrage non fertilisé

Texture : LA = limono-argileuse

AL = argilo-limoneuse

A = argileuse

ALS = argilo-limono-sableuse

ALF = argilo-limoneuse fine

grande teneur en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable des sols occupés par ces cultures.

Par contre, les sols occupés par la luzerne, pendant plus de deux années, sont les plus pauvres en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable. Néanmoins, ces sols coïncident avec les sols fersiallitiques et calcimagnésiques qui sont les moins pourvus en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable. Le type de sol pourrait donc avoir masqué l'effet de ce système de culture sur la teneur du sol en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable.

## Dynamique de l'ammonium non échangeable

La fraction de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable du sol est sujette à de considérables changements durant la période de suivi pour les différents types de sol et systèmes de culture (tableau 2). En effet, des

diminutions, variant de quelques mg kg<sup>-1</sup> à 88 mg kg<sup>-1</sup>, de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable, ont été observées (figure 3: site 2; site 12 et site 16), suggérant une libération d'ammonium non échangeable dans le profil du sol. Cette libération serait due à la nitrification et aux prélèvements de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> et de K<sup>+</sup> par les cultures (Green *et al.*, 1994). Ce résultat rejoint ceux obtenus par d'autres auteurs en Allemagne où les pertes en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable ont été évaluées, pour un blé d'hiver, à environ 450 kg N ha<sup>-1</sup> dans la zone racinaire (0-90 cm) pendant la période mai-juillet (Scherer, 1982). Ces pertes s'élèvent à 187 mg kg<sup>-1</sup> de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable pour un *Gleysol distique* au cours de la rotation blé d'été, maïs, blé d'hiver et ray grass (Scherer et Weimar, 1994).

Dans certains cas, la libération de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable a été notée pendant la période sèche "post récolte" du blé et de la betterave (juin-septembre) (figure 3: site 4 et site 10). Ce même phé-

nomène a été observé pour la libération de  $K^+$  non échangeable au cours de la dessiccation du sol et a été expliqué par l'hydrolyse des molécules d'eau et l'échange de  $K^+$  par les protons (Jackson et Luo, 1985 cité par Badraoui, 1988). Une autre explication pour le blé, dans le cas où il a reçu une pré-irrigation, serait le phénomène d'immobilisation de l'azote minéral par la microflore, lié à l'enfouissement des résidus de récolte à C/N élevé (91), celui-ci étant évalué en moyenne à  $80 \text{ kg N ha}^{-1}$  dans la couche 0-100 cm du sol (Berdai *et al.*, 2002). Cette disponibilité de  $NH_4^+$  non échangeable pour les micro-organismes du sol a déjà été mise en évidence par Scherer et Schneiders (1995) sous jachère et sous cultures. Une réduction significative de la fixation de  $NH_4^+$  a cependant été observée par Kowalenko (1981) et Zhang et Scherer (1999) lorsque l'amendement du sol par des substances à C/N élevé, telles que la cellulose ou le glucose, est accompagné par des apports élevés en  $NH_4^+$ . Ceci montre que l'ammonium non échangeable n'est sollicité par les micro-organismes que lorsque les quantités d'azote minéral dans le sol sont insuffisantes pour satisfaire leurs besoins.

Par ailleurs, des augmentations, atteignant  $58 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $N-NH_4^+$  non échangeable, ont été notées (*figure 3*: site 16; site 8 et site 9) suggérant une fixation de  $N-NH_4^+$  suite à l'apport d'engrais ammoniacaux et à la minéralisation de la matière organique native du sol. Mengel et Scherer (1981) et Scherer et Mengel (1986) ont également rapporté que le  $NH_4^+$ , provenant de l'ammonification, peut être fixé par les argiles. Cette augmentation de  $N-NH_4^+$  non échangeable du sol, se produisant pendant la saison de croissance des cultures, montre que lorsque l'azote se trouve en quantités excédentaires dans le sol, il est directement disponible pour les cultures, épargne la libération de  $N-NH_4^+$  non échangeable et une partie peut même être fixée dans l'espace inter-feuillets des argiles.

Pendant la période avril-juin qui constitue une période active pour la croissance de la luzerne, une augmentation de la teneur en  $N-NH_4^+$  non échangeable dans les couches de surface du sol a été accompagnée, dans 3 cas sur 5, par une diminution de cette teneur dans les couches profondes (*figure 3*: site 12 et site 15) suggérant une libération de  $N-NH_4^+$  non échangeable au niveau de la rhizosphère. La mobilisation de  $N-NH_4^+$  non échangeable dans l'interface sol-racine serait due, d'une part aux micro-organismes hétérotrophes et nitrifiants qui ont une activité plus grande dans la rhizosphère (Bottner *et al.*, 1988), influençant l'équilibre entre  $NH_4^+$  non échangeable et  $NH_4^+$  dans la solution du sol (Nommik et Vathras, 1982) et, d'autre part, à une forte densité des racines favorisant la diminution de la concentration de  $NH_4^+$  et de  $K^+$  dans la solution du sol (Scherer et Ahrens, 1996).

Dans certains cas, le  $N-NH_4^+$  non échangeable n'a pas été sollicité soit par suite de l'absence de plante (*figure 3*: site 18, profil de  $N-NH_4^+$  non échangeable du sol stabilisé après récolte d'oignon réalisée en mars), soit en raison d'une fertilisation azotée excessive apportée par l'agriculteur. Une libération négligeable de  $N-NH_4^+$  non échangeable sous jachère a également été rapportée par Scherer (1984). Néanmoins, le  $N-NH_4^+$  non échangeable a été fortement sollicité par la culture dérobée d'été (fourrage non fertilisé)

installée après la récolte d'oignon (*tableau 2*: site 19) où des diminutions de la teneur moyenne en  $N-NH_4^+$  non échangeable de 26 et  $39 \text{ mg N kg}^{-1}$ , soit 409 et  $617 \text{ kg N ha}^{-1}$ , ont été notées respectivement en juin et en septembre.

Pour certaines parcelles, la fixation de  $N-NH_4^+$  pendant un stade de suivi a été contrebalancée par la libération de la même quantité de  $N-NH_4^+$  non échangeable durant le stade suivant (*figure 3*: site 10, site 8 et site 9). Ce même résultat a été observé par Scherer (1982).

La capacité de fixation et de libération de  $N-NH_4^+$  non échangeable des sols du Tadla serait essentiellement liée à leur teneur en argile, d'une part et à leur contenu en smectites et dans une moindre mesure en illite, d'autre part. En effet, les smectites sont les argiles qui présentent, au même titre que les vermiculites, le potentiel le plus élevé de libération de  $NH_4^+$  non échangeable (Mengel *et al.*, 1990; Scherer et Weimar, 1994) alors que l'illite peut ou non fixer et libérer  $NH_4^+$ ; tout dépend de sa charge (Scherer et Ahrens, 1996).

Dans les sols du Tadla, les profils de  $N-NH_4^+$  non échangeable ont généralement varié, pendant la période de suivi, à l'intérieur d'un intervalle donné. Toute fixation de  $N-NH_4^+$  non échangeable a été généralement suivie d'une libération totale ou partielle et toute libération a été suivie d'une refixation de telle manière que le stock du sol en  $N-NH_4^+$  non échangeable est continuellement reconstitué.

Cette alternance fixation-libération de  $NH_4^+$  non échangeable du sol, répondant aux différents processus de rentrée et de sortie de  $NH_4^+$  dans le sol serait probablement aussi pilotée par les alternances humectation-dessiccation, fréquentes en zones méditerranéennes irriguées au cours des saisons de croissance des cultures, et par la variation saisonnière d'azote minéral dans le sol. L'effet des changements de température et d'humidité du sol a déjà été mis en évidence dans la fixation et la libération de  $K^+$  par les minéraux argileux (Badraoui, 1988). De même, la dessiccation du sol, induisant une ammonification de la matière organique du sol, favorise la fixation de  $NH_4^+$  si la nitrification est ralentie et favorise la libération de  $NH_4^+$  non échangeable si la nitrification accompagne l'ammonification (Zhang et Scherer, 1999).

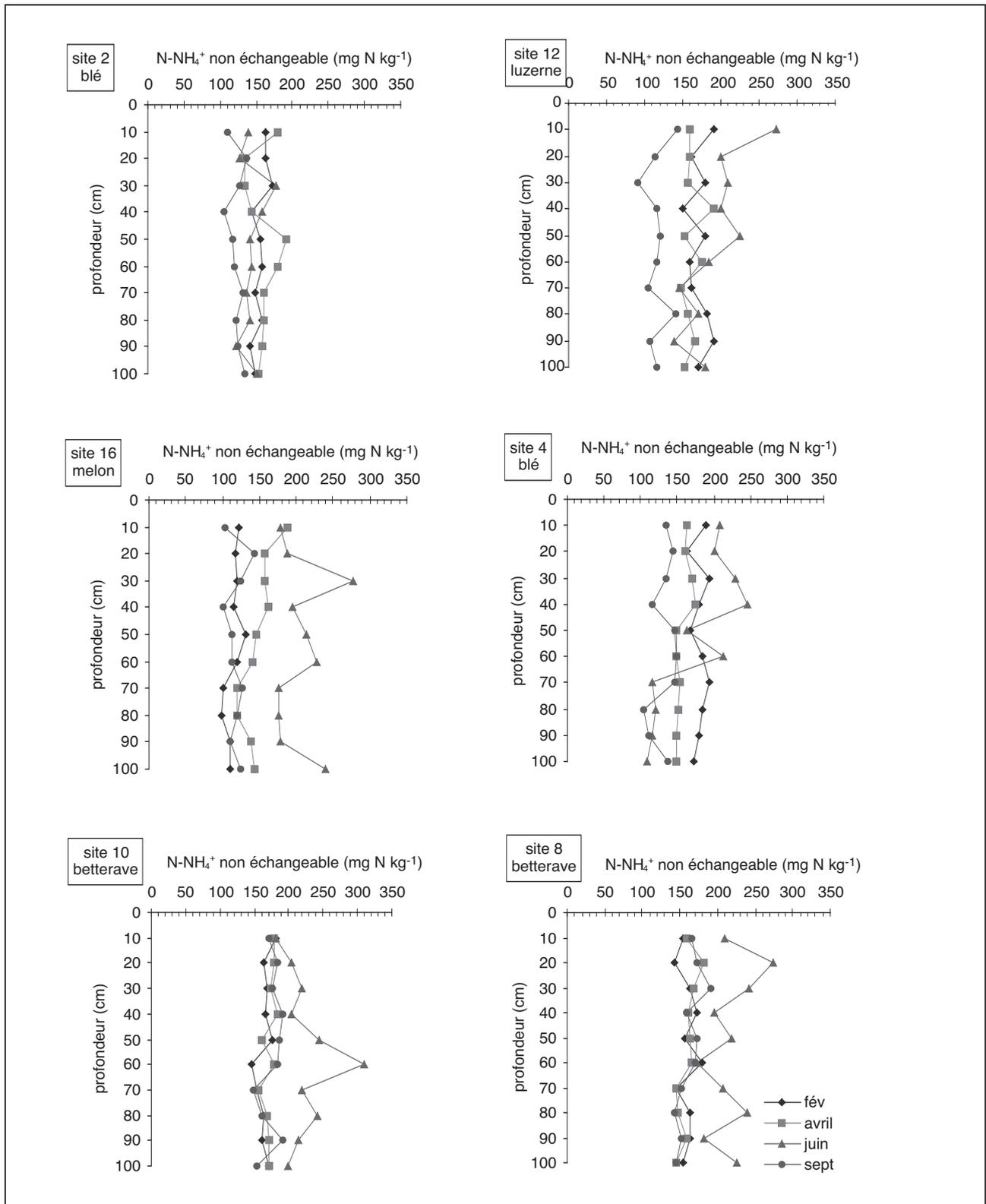
Par ailleurs, la libération de  $N-NH_4^+$  non échangeable a été mise en évidence pour toutes les cultures diagnostiquées et pour tous les niveaux de  $K_2O$  échangeable (de 150 à  $600 \text{ mg K}_2O$ ) (*tableau 2*). Ce résultat est contradictoire avec ceux obtenus par Scherer (1986) et Scherer et Ahrens (1996) qui ont montré que la teneur en  $K_2O$  échangeable et l'espèce de plantes cultivées ont un effet déterminant sur la dynamique de  $N-NH_4^+$  non échangeable dans le sol.

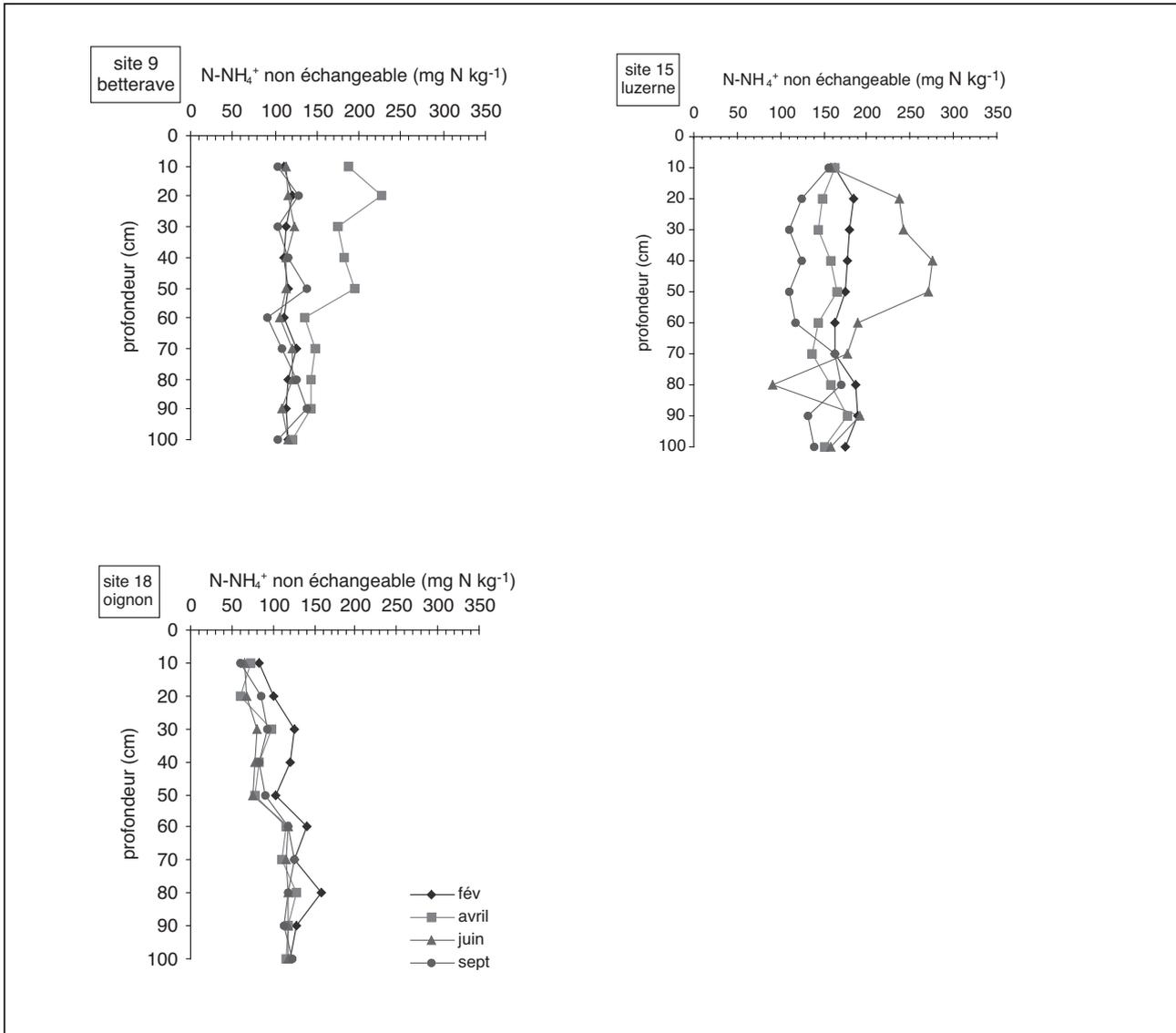
## CONCLUSION

Les sols du Tadla présentent une teneur appréciable en  $N-NH_4^+$  non échangeable. C'est la teneur en argile du sol qui détermine l'importance de  $NH_4^+$  non échangeable dans le sol. Cette teneur est sujette à des variations considérables au cours et après les différents cycles culturaux. Mais, pour l'ensemble des parcelles étudiées,

**Figure 3 - Evolution des profils de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> non échangeable du sol dans les parcelles de suivi**

**Figure 3 - Evolution of soil non exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N vertical distribution for the monitored plots**





aucune tendance d'évolution de  $\text{NH}_4^+$  non échangeable claire et bien définie n'a été mise en évidence, montrant ainsi que le mécanisme de fixation et de libération de l'ammonium dans le sol est très complexe.

Ce mécanisme, important dans les sols du Tadla, a des implications économiques, agronomiques et environnementales intéressantes, puisque l'azote ainsi retenu n'est pas lixiviable, mais reste cependant accessible à la végétation et à la microflore.

Néanmoins, ce pool d'azote, relativement labile, est jusqu'à présent négligé dans les stratégies de gestion de l'azote pour la production agricole dans le Tadla. Il pourrait donc générer un risque potentiel de pollution de la nappe par l'ion nitrate dans cette région, d'autant plus que les quantités d'azote minéral mises en jeu par ce processus peuvent atteindre des valeurs considérables.

Des études additionnelles, utilisant le  $^{15}\text{N}$ , sont nécessaires afin

de mieux comprendre la dynamique de fixation et de libération de  $\text{NH}_4^+$  des sols du Tadla, pour différents systèmes de culture, en relation avec les facteurs écologiques. Il serait également intéressant de rechercher des équations qui décrivent ce processus et les intégrer dans les modèles de simulation d'azote minéral dans le sol.

Par ailleurs, d'après les résultats obtenus, la fixation et la libération de  $\text{NH}_4^+$  non échangeable au cours d'une saison agricole peuvent se produire à une échelle de temps plus courte que celle généralement reconnue. L'étude de ce processus devrait donc être conduite moyennant une grande fréquence d'échantillonnage qui permettrait de détecter les variations rapides de  $\text{N-NH}_4^+$  non échangeable dans le sol. La méthode simplifiée de détermination de  $\text{N-NH}_4^+$  non échangeable pourrait alors être utilisée pour diminuer le coût des analyses qui seront plus fréquentes (Zhang et Scherer, 1998).

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement le personnel du Laboratoire de l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Tadla pour l'aide qu'il nous a apporté pour la réalisation de ce travail, et en particulier Mme Cherkaoui F.Z. et M. Hassouna.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aghzar N., Berdai H., Bellouti A. et Soudi B., 2002 - Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau. Rev. Sci. Eau*, 15/2, pp. 577-610.
- Badraoui M., 1988 - Mineralogy and potassium availability in soils from the Chaouia and Gharb regions of North western Morocco. Ph D Dissertation, University of Minnesota, St. Paul, Minnesota, USA, 199 p.
- Badraoui M., Agbani M., Merzouk A., Bloom P.R., Bouabid R., Soudi B., Mimouni A., Annouaoui A. et Bouchaara S., 1991 - Chemistry and mineralogy of potassium in Moroccan soils: Implications for fixation and release. *Proceedings of the Fourth Regional Workshop, Fertilizer Use Efficiency under Rain-fed Agriculture in West Asia and North Africa, 5-10 May, Agadir, Morocco*, pp. 16-27.
- Badraoui M., Agbani M. et Soudi B., 1997 - Potassium status in soils and crops, recommendations and present use in Morocco. *In: A. E. Johnston (Ed.), proc. of Food security in the WANA region, the essential need for balanced fertilization. 26-30 May, Bornova, Izmir, Turkey*, 10 p.
- Badraoui M. et Bloom P.R., 1989 - The effects of wetting and drying cycles, temperature and extracting solutions on measured potassium fixation in soils of two regions of Morocco. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 20, pp. 1353-1375.
- Badraoui M., Bloom P.R. et Delmaki A., 1992 - Mobilization of non exchangeable K by ryegrass in five Moroccan soils with and without mica. *Potash Review*, No. 2, pp. 1-15.
- Badraoui M., Soudi B., Moujahid Y., Bennani F., Bouhlassa S. et Mikou M., 1995 - Mineralogical considerations in soil fertility management in Morocco. *Proceedings of the Soil Fertility Workshop, Accomplishments and Future Challenges in Dry Land Soil Fertility Research in the Mediterranean Area, 19-23 November, Aleppo, Syria*, pp. 267-278.
- Berdai H., Aghzar N., Cherkaoui F.Z. et Soudi B., 2002 - Azote minéral résiduel et son évolution pendant l'été en fonction du précédent cultural en climat méditerranéen. *Etude et Gestion des Sols*, 9, pp. 7-23.
- Bottner P., Sallih Z. et Billes G., 1988 - Root activity and carbon metabolism in soils. *Biol. Fertil. Soils*, 7, pp. 71-78.
- Bouazzama B. et Bouyahiaoui A., 2000 - Situation actuelle de la qualité des sols et des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla. *Mémoire de 3ème cycle, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II / Département des Sciences du Sol*, 122 p.
- Bremner J. M., 1960 - Determination of nitrogen in soil by the Kjeldahl method. *J. Agric. Sci.*, 55, pp.11-33.
- Chapman H. D., 1965 - Cations exchange capacity. *In Black C.A. et al (ed.), Methods of Soil Analysis. Agronomy*, 9, pp.891-901. Am. Soc. Agron., Inc., Madison, Wis.
- Day P. R., 1956. Report of the Committee on Physical Analysis, 1954-55. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 20, pp. 167-169.
- Drury C. F. et Beauchamp E. G., 1991 - Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high and low fixing soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55, pp. 125-129.
- FAO, 1989 - Carte Mondiale des Sols: Légende Révisée. *Rapport sur les Ressources en Sols du Monde N° 60. FAO-UNESCO*, 125 p.
- Green C. J., Blackmer A. M. et Yang N. C., 1994 - Release of fixed ammonium during nitrification in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, pp.1411-1415.
- Keeney D.R. et Nelson D.W., 1982 - Nitrogen-Inorganic Forms. *In Page A. L. et al. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy*, 9: 643-682. ASA, SSSA, Madison, Wis. USA.
- Knudsen D., Peterson G. A. et Pratt P.F., 1982 - Exchangeable and soluble potassium. *In Page A. L. et al. (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Agronomy*, 9, pp.228-238. ASA, SSSA, Madison, Wis. USA.
- Kowalenko C. G., 1978 - Nitrogen transformations and transport over 17 months in field fallow microplots using <sup>15</sup>N. *Can. J. Soil Sci.*, 58, pp. 69-76.
- Kowalenko C.G., 1981 - Effect of immobilization on nitrogen transformations and transport in a field <sup>15</sup>N experiment. *Can J. Soil Sci.*, 61, pp. 387-395.
- Kowalenko C. G. et Cameron D. R., 1976 - Nitrogen transformations in an incubated soil as affected by combinations of moisture content and temperature and adsorption-fixation of ammonium. *Can. J. Soil Sci.*, 56, pp. 63-70.
- Liang B. C. et Mac Kenzie A. F., 1994 - Fertilization rates and clay fixed ammonium in two Quebec soils. *Plant and Soil*, 163, pp. 103-109.
- Mengel K., Horn D. et Tributh H., 1990 - Availability of inter layer ammonium as related to root vicinity and mineral type. *Soil Sci.*, 149, pp. 131-137.
- Mengel K. et Scherer H. W., 1981 - Release of non exchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil Sci.*, 131, pp. 226-232.
- Nelson et Sommers, 1975 - A rapid and accurate procedure for estimating of organic carbon in soil. *Proc. Indiana Acad. Sci.*, 84, pp. 456-462.
- Nommik H., 1965 - Ammonium fixation and other reactions involving a non enzymatic immobilization of mineral nitrogen in soil. *In Bartholmew, W. V. and F. E. Clark (eds.): Soil Nitrogen, Monograph Am. Soc. Agron.*, 10, pp. 198-258.
- Nommik H. et Vathras K., 1982 - Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. *In: F. J. Stevenson (Ed.), Nitrogen in agricultural soils. Monograph Am. Soc. Agron.*, 22, pp. 123-171.
- ORMVAT, 1996 - Données sur l'Occupation du Sol par Centre de Développement Agricole: Campagne 1995-1996.
- Scherer H. W., 1982 - Fixed NH<sub>4</sub>-N in relation to EUF-extractable K. *Plant and Soil*, 64, pp. 67-71.
- Scherer H.W., 1984 - Beziehung zwischen dem stickstoff, Entzug der Pflanzen und der Abnahme von spezifisch gebundenem NH<sub>4</sub>-N im Boden. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.*, 147, pp. 29-36.
- Scherer H. W., 1986 - The influence of potassium on the fixation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and the mobilization of non exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. *Plant Research and Development, Volume 23*, pp. 78-90.
- Scherer H. W. et Ahrens G., 1996 - Depletion of non exchangeable NH<sub>4</sub>-N in the soil root interface in relation to clay mineral composition and plant species. *Eur. J. Agron.*, pp. 5: 1-7.
- Scherer H. W. et Mengel K., 1986 - Importance of soil type on the release of non exchangeable NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and availability of fertilizer NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and fertilizer NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. *Fertilizer Research*, 8, pp. 249-258.
- Scherer H. W. et Schneiders M., 1995 - Verfügbarkeit von spezifisch gebundenem ammonium für mikroorganismen (Availability of non exchangeable ammonium to soil microorganisms). *Agrobiol. Res.* 48, 2, pp. 138-145.
- Scherer H. W. et Weimar S., 1993 - Release of non exchangeable NH<sub>4</sub>-N after planting of rye grass in relation to soil content and as affected by nitrate supply. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.* 156, pp. 143-148.
- Scherer H. W. et Weimar S., 1994 - Fixation and release of ammonium by clay minerals after slurry application. *Eur. J. Agron.*, 3, pp. 23-28.
- Scherer H. W. et Zhang Y. S., 1999 - Studies on the mechanisms of fixation and release of ammonium in paddy soils after flooding. I. Effect of iron oxides on ammonium fixation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 162, pp. 593-597.
- Silva J. A. et Bremner J.M., 1966 - Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30, pp. 587-594.
- Soudi B., Chiang C.N., Badraoui M., Agbani M. et Ben Halima M., 1991 -

- Characterization and distribution of nitrogen forms in selected soils of Morocco. Proceedings of the Fourth Regional Workshop, Fertilizer Use Efficiency under Rain-fed Agriculture in West Asia and North Africa, 5-10 May, Agadir, Morocco, pp. 159-168.
- Sowden F. J., Maclean A. A. et Ross G. J., 1978 - Native clay fixed ammonium content and the fixation of added ammonium in some soils of eastern Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 58, pp. 27-32.
- STATITCF, 1991 - Logiciel statistique, version 5.
- Thompson T. L. et Blackmer A.M., 1993 - Fixation and release of  $N^{15}$  labeled ammonium during soil drying. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 24, pp. 613-622.
- Zhang Y. et Scherer H.W., 1998 - Simplification of the standard method for determination of non exchangeable  $NH_4-N$  in soil. *Z. Pflanzenernähr. Bodenkd.* 161, pp. 101-103.
- Zhang Y. et Scherer H.W., 1999 - Ammonium fixation by clay minerals in different layers of two paddy soils after flooding. *Biol. Fertil. Soils*, 29, pp. 152-156.
- Zhang Y. et Scherer H.W., 2000 - Mechanisms of fixation and release of ammonium in paddy soils after flooding. II. Effect of transformation of nitrogen forms on ammonium fixation. *Biol. Fertil. Soils*, 31, pp. 517-521.

