

ABSORPTION ET MOUVEMENT DE L'AMMONIUM EN SOL SALE

A. DELLAL ⁽¹⁾, F. EL ETREIBY ⁽²⁾, TANG VAN HAI ⁽³⁾

RESUME

Ce travail porte sur le mouvement par convection et dispersion de l'ammonium dans le sol, la perfusion d'un système racinaire de plants de riz intacts par une solution nutritive, la perfusion d'un sol salé de Rélizane (Algérie) contenant le système racinaire de plants de riz intacts. Toutes ces expériences étaient répétées à des concentrations en NaCl variant de 0 à 50 mM.

L'analyse des courbes d'éluion de l'ammonium à travers le sol a permis de calculer les deux paramètres essentiels pour le transport convectif d'un soluté à travers le sol : la distance de dispersion du milieu poral et l'influence de la concentration en NaCl sur ce paramètre. L'autre paramètre, le facteur de rétention de l'ammonium, est susceptible d'une estimation approximative assez aisée, ce qui permettrait de calculer le mouvement convectif de l'ammonium dans un sol.

La comparaison de l'efficacité de l'absorption de l'ammonium par des plants de riz intacts âgés de 40 à 60 jours dont les racines se trouvaient soit dans une solution nutritive, soit, dans du sol allégé de sable n'a pas montré de différences importantes en ce qui concerne l'effet de l'augmentation de la concentration en NaCl.

En ce qui concerne l'efficacité de l'absorption du nitrate, on a observé qu'elle tombe à des valeurs négligeables dès que la concentration en NaCl atteint 40 mM.

Il semble donc bien que tant pour les sols d'Afrique du Nord, où se poseraient des problèmes de salure que pour les sols de limon du N.W. de l'Europe, tant l'optimisation du coefficient d'utilisation de l'engrais azoté, que la réduction de la pollution des aquifères, se réaliseront dans des conditions qui minimisent la vitesse d'oxydation biologique de l'azote ammoniacal.

MOTS-CLES : Ammonium - NaCl - Absorption - Rétention - Dispersion - Adsorption.

KEY WORDS : Ammonium - NaCl - Absorption - Retention - Dispersion - Adsorption.

INTRODUCTION

Le mouvement de l'ammonium dans le sol a suscité moins d'intérêt que la lixiviation du nitrate et ce, pour des raisons évidentes. Le fait que le nitrate soit peu adsorbé aux surfaces solides du sol et son exclusion d'une partie de l'eau du sol par adsorption négative font que son lessivage est rapide. D'autre part, les diverses réactions d'adsorption que peut subir l'ammonium dans le sol (soit par

(1) Institut d'Enseignement Supérieur en Agronomie, Tiaret (Algérie)

(2) Soil and Water Institute Soil Salinity Laboratory Bacous, Alexandria (Egypt).

(3) Auteur auquel toute correspondance relative à cette communication doit être envoyée : Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Agronomiques, Unité des Sciences du Sol, Place Croix du Sud, 2, B - 1348 Louvain-la-Neuve (Belgique).

échange ionique, soit par « fixation ») ont comme résultat que son mouvement est considérablement ralenti par rapport à celui du nitrate. Enfin, dans les sols agricoles, sa transformation biologique en nitrate est généralement suffisamment rapide pour que l'attention se porte essentiellement sur le déplacement du nitrate et son rôle dans la contamination des aquifères.

Il existe toutefois des cas où le mouvement de l'ammonium dans les sols mérite une attention au moins égale à celle qui est accordée au nitrate.

Dans les pays du Nord-Ouest de l'Europe, les applications de lisier provenant des élevages industriels peuvent dépasser le pouvoir auto épurateur du sol, compte tenu du temps de séjour moyen de l'ammonium dans les couches superficielles biologiquement actives.

Dans les pays arides ou subarides de l'Afrique du Nord, l'ammonium peut, et souvent doit, être préféré au nitrate en raison de son effet acidifiant ; son mouvement dans le sol se fera de façon différente suivant la charge sodique des eaux d'irrigation et il en sera de même de son absorption par les plantes.

I. MATERIEL ET METHODES

Pour répondre à ces deux types de problème, deux échantillons de sols ont été choisis : l'un, d'Afrique du Nord, l'autre, typique de l'Europe du Nord-Ouest.

Un échantillon de sol a été prélevé en Afrique du Nord dans la région du Bas-Chélif, près de Relizane (Algérie). Tous les sols de cette région ont été minutieusement décrits par BOULAIN (1957). L'échantillon provient d'un horizon situé à 40 cm de profondeur et est constitué de 51 % d'argile et de 35 % de limon avec 14 % de sable. La teneur en carbone était de 0,9 % avec un rapport C/N = 7. La capacité d'échange des cations était de 20 mé par 100 g. La surface spécifique était de 173 m².g⁻¹ correspondant à la nature des minéraux argileux : mélange de montmorillonite, d'illite et de kaolinite. Dans son état naturel, ce sol est salé à alcali avec un pourcentage de sodium échangeable de 30 % et une conductivité de l'extrait à saturation de 6 mS.cm⁻¹, son pH est de 8,5. La CEC et les cations échangeables sont obtenus par déplacement à l'acétate d'ammonium neutre normal.

Dans le périmètre de Relizane, plus de 60 % des sols sont des sols salés à alcali de morphologie classique, leur stabilité structurale est médiocre.

L'échantillon de sol d'Europe du Nord-Ouest provient d'une plaine de limon nivéolien (löss) typique de ces terres très productives et soumises à une intensification considérable de l'agriculture et de l'élevage. Les échantillons ont été prélevés à la Station de Recherches Agronomiques de Gembloux à Liroux (Belgique).

Ces sols lœssiques à horizon B textural tronqué ont été cartographiés et les résultats ont été publiés dans le feuillet « Gembloux 130E » de la Carte des Sols de Belgique ; leurs propriétés générales sont décrites dans la notice de ce feuillet par PECROT et al. (1956).

Cet échantillon de sol a été prélevé à une profondeur de 150 cm. Sa teneur en argile est de 24,7 % et sa teneur en limon de 69 %. Son pH est de 7,2. Sa teneur en matière organique est de 1,23 %.

Comme la perméabilité de ces deux sols (d'Algérie et de Belgique) est faible, on a mélangé la terre avec du sable lavé dans la proportion de 1 à 3 ou de 1 à 2.

Le diamètre moyen des particules du sable utilisé allait de 0,1 à 0,5 mm et la valeur médiane du diamètre était de 0,25 mm. Le but de ce mélange était d'obtenir un débit de solution suffisamment rapide à travers les colonnes de sol.

Cettes-ci étaient réalisées dans des allonges en plexiglass d'un diamètre interne de 4,6 cm et d'une longueur utile de 50 cm. La partie inférieure de la colonne consistait en une plaque de verre fritté de porosité suffisamment grossière pour éviter son colmatage.

L'échantillon de sol salé de la plaine de Relizane, après sa distribution dans les colonnes, a été préalablement uniformisé au point de vue chimique en y percolant une solution de chlorure de calcium 0,01 M jusqu'à l'absence de modification de la solution percolante, ce qui correspondait à une réduction du taux de Na échangeable à une valeur très faible.

Les colonnes de sol destinées à suivre le mouvement de l'ammonium en absence de plante étaient pesées après ressuyage de la solution de CaCl_2 , ce qui permettait le calcul de la masse volumique apparente et de la teneur volumique en eau, compte tenu de la masse de terre sèche introduite dans la colonne. Cette teneur volumique en eau a été vérifiée par γ -densitométrie. La teneur moyenne en eau ainsi trouvée était en bon accord avec celle qui avait été déterminée gravimétriquement et les variations de teneur en eau le long de l'axe de la colonne étaient négligeables.

La vitesse d'infiltration dans la colonne pour les diverses expériences était de 3,0 cm par jour, en moyenne, mais quelque peu plus lente au début du conditionnement des colonnes.

L'effluent des colonnes était recueilli et fractionné par un collecteur de fractions. La concentration en ammonium de chaque fraction était alors déterminée.

L'ammonium était injecté dans la colonne pendant la perfusion avec la solution 0,01 M de CaCl_2 en concentration 1,036 mM soit sous forme de fraction correspondante à quelque 0,6 du volume poreux de la colonne, soit de façon continue pendant un temps suffisamment long pour que sa concentration à la sortie devienne égale à la concentration d'entrée.

Les concentrations en ammonium trouvées dans l'effluent étaient utilisées pour ajuster les paramètres de l'équation de diffusion avec convection appliquée à un soluté susceptible d'adsorption lors de son passage à travers un milieu poreux.

L'équation de continuité prend, dans ce cas, la forme :

$$\frac{\delta c}{\delta t} + \frac{\rho}{\theta} \frac{\delta S}{\delta t} = D \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} - v \frac{\delta c}{\delta x} \quad (1)$$

où :

- c est la concentration du soluté du sol qui se déplace à travers ses pores à une vitesse moyenne constante v,
- x est la coordonnée de distance,
- t, le temps,
- ρ est la masse volumique apparente,
- θ est l'humidité volumétrique,
- S est la concentration du soluté adsorbé.

Si la relation entre S et la concentration c peut s'exprimer par :

$$S = Kc, \quad (2)$$

en d'autres mots, si le coefficient de partage de l'ammonium entre la solution et la phase solide est constant, l'équation de diffusion prend alors la forme :

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D' \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} - v \frac{\delta c}{\delta x} \quad (3)$$

où D' est le coefficient de dispersion hydrodynamique D divisé par le facteur de rétention R défini par :

$$R = 1 + \rho K / \theta \quad (4)$$

A partir de l'ajustement de solutions analytiques de l'équation (3) aux données expérimentales, on peut obtenir une estimation du facteur de rétention R et du nombre de Péclet défini par :

$$P = vL/D \quad (5)$$

où L est la longueur de la colonne.

Il est inutile de revenir ici sur la forme de ces solutions analytiques ni sur les conditions aux frontières qui sont imposées. Elles ont été décrites avec beaucoup de détails par VAN GENUCHTEN (1981) de même que les méthodes de calcul permettant l'ajustement non linéaire des courbes théoriques aux résultats expérimentaux (VAN GENUCHTEN et al., 1976, 1977).

On obtient ainsi la valeur du coefficient de dispersion hydrodynamique du milieu poreux étudié, lequel représente le degré de mélange entre les solutions déplaçantes et déplacées dans la colonne contenant ce milieu poreux, on obtient aussi, par un calcul simple, le coefficient de partage de l'ammonium entre la solution du sol et les surfaces de sa phase solide.

La présence du système racinaire d'une plante doit modifier considérablement le mouvement de l'ammonium dans le sol. Pour en obtenir la description qualitative, nous avons procédé de la façon suivante : après une préparation des colonnes de sol identique à ce qui a été décrit ci-dessus, on repiquait deux plants de riz (variété IR 42) âgés de 40 jours par colonne, soit, deux plants sur une surface de sol de 17 cm², et donc une densité extrêmement élevée assurant le développement d'un système racinaire extrêmement abondant.

Toutes les colonnes, avec ou sans plantes, étaient alimentées par une solution nutritive dans laquelle la concentration en NaCl était : 0, 10, 30 et 50 millimolaire, ce qui correspondait à la gamme des concentrations supportables par la plante jusqu'au seuil de toxicité de la salure (BERNSTEIN, 1970 ; KADDAH et al., 1973 ; MAAS et al., 1978).

L'expérience se déroulait dans une chambre de culture, l'intensité lumineuse à la surface des colonnes était de 480 kcal.m⁻² pendant 12 heures. Les températures diurne et nocturne étaient respectivement de 30 et 25°C. L'humidité relative était constamment maintenue à 80 pour cent. Une couche de grenailles noires en PVC était disposée à la surface du substrat pour diminuer l'évaporation mais surtout pour éviter le développement des algues.

La composition de la solution nutritive était la suivante (en mM) : (NH₄)₂SO₄ : 0,714 ; KH₂PO₄ : 0,320 ; KCl : 0,255 ; CaCl₂.2H₂O : 0,250 ; MgSO₄.7H₂O : 0,041 ; Fe EDTA.Na : 0,018 plus les oligoéléments de la solution de Hoagland à raison de 1 ml/l (H₃BO₃ ; MnCl₂.4H₂O ; ZnSO₄.7H₂O ; CuSO₄.5H₂O et (NH₄)₆MO₇O₂₄.4H₂O).

Les solutions ne différaient donc que par la concentration en Na dans la gamme mentionnée ci-dessus. La teneur en ammonium était toujours la même, quel que soit le type d'expérience.

L'expérience était arrêtée, comme pour les essais de percolation sans plantes, lorsque la teneur en ammonium de l'effluent ne différait plus de la teneur à l'entrée.

Une interprétation, même très partielle de l'effet de la concentration en Na⁺ sur la consommation de l'azote ammoniacal dans un milieu aussi complexe que le sol, nécessite des données sur la réaction de la plante à ce même facteur en conditions parfaitement contrôlées.

Ceci a été réalisé en mesurant la quantité d'ammonium absorbé par des plantes âgées de 40 à 67 jours. Le système racinaire de ces plantes plongeait dans une solution nutritive dont la composition a été donnée ci-dessus. Cette solution était renouvelée constamment suivant la méthode classique du flux continu. Lorsque cette solution nutritive traverse le système racinaire avec un débit Q, le rapport de la quantité absorbée à la quantité présentée est donné par (1 - Cs/Co) où Cs et Co sont les concentrations à l'entrée et à la sortie du récipient contenant le système racinaire des plantes. Une description plus détaillée de cette méthode a été présentée ailleurs (TANG VAN HAI et LAUDELOUT, 1966).

II. RESULTATS

Les résultats expérimentaux obtenus suivant les méthodes décrites ci-dessus seront présentés dans l'ordre suivant :

- (1) Les observations sur le mouvement de l'ammonium dans le sol avec le facteur de retard qui le caractérise par rapport au mouvement de l'eau ainsi que sa fixation irréversible au cours de ce mouvement en fonction de la concentration en Na dans le sol ;
- (2) Les observations sur l'absorption de l'ammonium par le riz en présence de quantité croissante de Na dans une solution nutritive renouvelée constamment ;
- (3) L'absorption de l'ammonium par le système racinaire du riz dans un sol perfusé par une solution nutritive contenant de l'ammonium en présence de concentrations croissantes en NaCl.

A) Percolation et rétention de l'ammonium à travers le sol

Le mouvement de l'ammonium dans un échantillon de sol de Relizane à différents niveaux de concentration en NaCl est décrit par les courbes de la Fig. 1. Ces courbes théoriques ont été ajustées aux points expérimentaux de la figure 1.

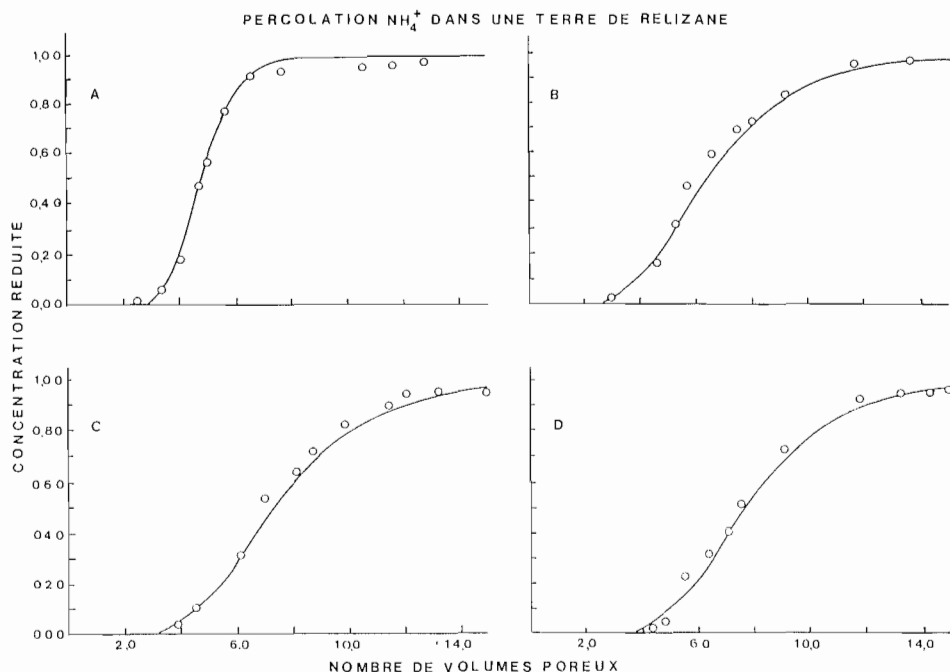


Figure 1 : Courbes d'éluion de l'amomnium dans l'échantillon de sol de Relizane en présence de concentrations croissantes : A = 0 mM de NaCl, B = 10 mM de NaCl, C = 30 mM de NaCl, D = 50 mM de NaCl dans la solution percolante. Les points expérimentaux ont été utilisés, comme décrit dans le texte pour le calcul des courbes théoriques (en trait continu). Les paramètres de ces courbes théoriques sont reproduites au tableau I.

Elution curves of ammonium in the soil column of Relizane at different sodium concentrations : A = 0 mM, B = 10 mM, C = 30 mM, D = 50 mM. The experimental points have been used, as described in the text, for the calculation of the theoretical curves (continuous curves). The parameters of the theoretical curves are represented in Table I.

L'accord entre les courbes théoriques (solutions analytiques des équations (1) ou (3) en coordonnées réduites) et les points expérimentaux est satisfaisant et on peut attacher un certain crédit à la valeur des deux paramètres qui ont été manipulés pour obtenir cet ajustement soit P, le nombre de Péclet (équation 5) et le facteur de rétention, R (ég. 4).

Rappelons que la transformation des données expérimentales telles que la concentration de l'effluent et le volume de liquide qui a traversé la colonne en grandeurs adimensionnelles se fait très simplement en convertissant le temps courant en un temps réduit par l'expression $\tau = vt/L$ où v et L ont été définis par les équations (1) et (5).

Le sens de cette grandeur adimensionnelle est extrêmement simple : elle représente le nombre de fois que la solution contenue dans les pores du sol a été renouvelée par la solution percolante.

Les deux nombres P et R qui ont été calculés à partir de cet ajustement permettent d'obtenir une estimation quantitative de la dispersion de l'ammonium pendant son mouvement convectif et de son coefficient de partage entre la solution et les colloïdes du sol. En effet, les deux nombres en question résultent de la combinaison de paramètres purement expérimentaux préalablement fixés et de paramètres propres au milieu poreux. En fait, le coefficient de dispersion hydrodynamique s'exprime plus clairement en le transformant en une distance de dispersion considérée comme le coefficient de proportionnalité supposé constant entre la dispersion hydrodynamique et la vitesse moyenne du fluide.

La distance de dispersion d s'obtient en divisant la longueur de la colonne par le nombre de Péclet (équation 5) puisque :

$D = d.v$ ou bien

$$d = \frac{D}{v} = \frac{D}{vL} \cdot L = \frac{L}{P}$$

Quant au coefficient de distribution de l'ammonium K, il s'obtient directement à partir de l'équation (4) par :

$$K = \frac{\theta(R - 1)}{\rho}$$

Pour $\rho = 1,10$ et $\theta = 0,25$, nous obtenons les valeurs de K du tableau I, dans lequel nous avons également reporté les distances de dispersion en fonction de la concentration en NaCl.

Si l'introduction de l'ammonium de façon continue dans la colonne de sol favorise la comparaison avec l'expérience où des plantes se développent en présence d'une solution nutritive constamment renouvelée, il est plus commode d'injecter une fraction de solution contenant de l'ammonium pour effectuer non seulement le calcul du facteur de rétention, mais aussi celui du bilan matière pour l'ammonium de façon à mettre en évidence la quantité fixée irréversiblement.

Tableau I : Distance de dispersion et coefficient de distribution de l'ammonium dans une terre de Relizane.

Distance of dispersion and coefficient of distribution of ammonium in the soil of Relizane.

Molarité Na	Distance de dispersion (cm)	Coefficient de distribution K (ml.g ⁻¹)
0	1,23	0,87
10	4,17	1,25
30	3,76	1,45
50	3,05	1,55

Les figures 2 et 3 montrent l'allure de l'éluion d'une fraction d'ammonium soit, à travers du sable lavé, soit, à travers un mélange de sol lœssique et de sable pour une largeur d'une fraction d'ammonium de 0,56 dans le sable et de 0,36 dans le mélange de sol lœssique et de sable.

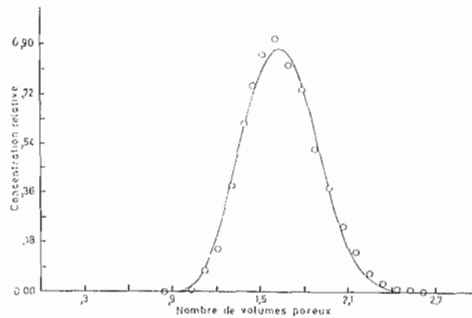


Figure 2 :

Elution de l'ammonium d'une colonne de sable lavé. La largeur d'une fraction de sulfate d'ammonium injectée est de 0,56 volume poreux. L'ajustement de la courbe théorique (en trait continu) aux points expérimentaux donne un nombre de Péclet de 114 et un facteur de rétention de 1,4.

Elution of ammonium in a sand column. The injected fraction of ammonium sulfate is 0.56 pore volume. Adjustment of the theoretical curve (continuous curve) to experimental points values gives : Peclet number = 114 and retention factor = 1.4.

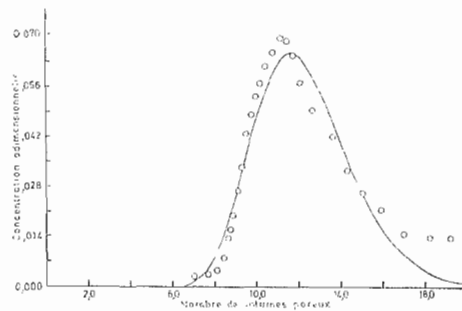


Figure 3 :

Elution de l'ammonium à travers un sol lœssique enrichi d'un tiers de sable (poids pour poids), la largeur d'une fraction de sulfate d'ammonium est de 0,36 volume poreux. L'ajustement de la courbe théorique aux points expérimentaux donne un nombre de Péclet de 56 et un facteur de rétention de 12.

Elution of ammonium through a loess soil with sand addition (weight for weight), the injected fraction of ammonium sulfate is 0.36 pore volume. Adjustment of the theoretical curve to experimental points values gives : Peclet number = 56 and retention factor = 12.

La comparaison des figures 2 et 3 montre clairement l'effet du sol lœssique mélangé d'un tiers de sable sur le facteur de rétention de l'ammonium. On voit que le sommet d'une fraction d'ammonium n'apparaît dans l'effluent que lorsque la solution contenue dans les pores du sol a été remplacée environ douze fois.

Dans une colonne de sable dont la capacité d'échange des cations est très faible, mais non négligeable pour le cas qui nous occupe, il suffit de remplacer la solution du sol une fois et demie pour que le sommet d'une fraction d'ammonium apparaisse dans l'effluent.

La dispersion hydrodynamique est beaucoup plus petite dans le sable que dans le sol lœssique : un phénomène bien connu et qui se traduit quantitativement par un nombre de Péclet de 114 pour le sable et de 56 pour le sol lœssique mélangé d'un tiers de son poids de sable.

Comme il fallait s'y attendre, le coefficient de partage de l'ammonium entre la solution et les surfaces solides passe de $RF = 1$ dans le sable à $RF = 10$ dans le sol lœssique.

Toutefois, le coefficient de rétention RF ou ce qui revient au même, comme nous l'avons vu ci-dessus, le coefficient de partage de l'ammonium entre la solution et les colloïdes, ne représente au mieux qu'un paramètre commode pour le calcul du mouvement de l'ammonium dans le sol. En effet, il recouvre à la fois l'échange entre les ions Ca^{++} , Na^+ et NH_4^+ dans les conditions choisies pour l'expérience mais aussi, une « fixation » irréversible dans ces mêmes conditions. On peut la mettre facilement en évidence dans des expériences du type qui vient d'être décrit ne mettant en jeu qu'une quantité limitée d'ammonium sous forme de fraction injectée dans le sol. On

ne retrouve que 45 % de l'ammonium appliqué dans l'effluent lorsque la colonne contient du sol mais 98,5 %, lorsqu'elle ne contient que du sable.

Lorsque le coefficient de distribution se mesure de façon statique en agitant pendant 24 heures, à une température voisine de 0°, une suspension de 50 g de sol dans 200 ml de CaCl_2 0,01 M, en présence de concentration croissante de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (de 0 à 50 ppm d'azote ammoniacal dans la solution), on mesure dans le surnageant, après centrifugation du sol des quantités d'ammonium linéairement proportionnelles aux concentrations initiales ($r^2 = 0,98$) qui permettent de calculer un coefficient de distribution « statique » de $6,87 \text{ ml.g}^{-1}$, lequel peut être comparé au coefficient de distribution « dynamique » de $2,5 \text{ ml.g}^{-1}$ obtenu à partir de l'expérience de la fig. 3.

B) Absorption de l'ammonium par le riz en présence de concentrations croissantes en sodium

L'efficacité de l'absorption de l'ammonium par des plants de riz d'au moins quarante jours a été étudiée par la méthode du flux continu de culture en condition de température, lumière et hygrométrie parfaitement définies comme il a été décrit ci-dessus.

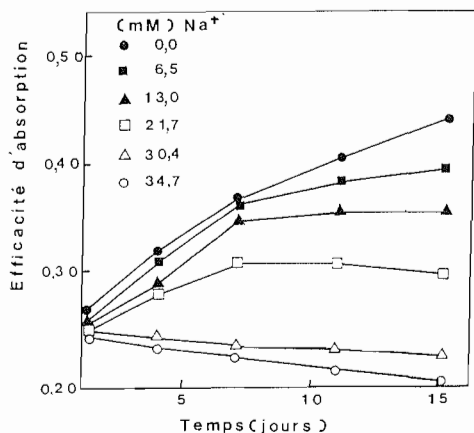


Figure 4 :

Evolution de l'efficacité de l'absorption de l'ammonium par des plants de riz âgés de 50 à 65 jours en fonction des concentrations en sodium de la solution nutritive ; de haut en bas : 0 ; 6,5 ; 13,0 ; 21,7 ; 30,4 et 34,7 mM en NaCl.

Efficiency of ammonium uptake by rice plant of 50 to 65 days old at different sodium concentrations in the nutrient solution : from top to bottom : 0 ; 6.5 ; 13.0 ; 21.7 ; 30.4 and 34.7 mM NaCl.

La fig. 4 montre comment varie l'efficacité d'absorption à partir du premier jour de l'expérience, en présence des quantités croissantes de sodium dans la solution nutritive. Si l'efficacité d'absorption augmente avec le temps, le système racinaire se développant, la présence de sodium en concentration croissante freine cette augmentation et finit par la faire diminuer au-delà d'une concentration relativement faible de l'ordre de 20 mM.

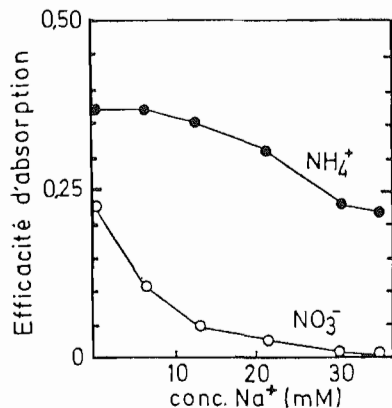


Figure 5 :

Efficacité d'absorption comparée pour l'ammonium et le nitrate en fonction de la molarité en sodium de la solution nutritive.

Comparison of the uptake efficiency of ammonium and nitrate at different sodium concentration in the nutrient solution.

La fig. 5 montre comment varie l'absorption de l'ammonium en fonction de la concentration en sodium pour des plants âgés de 55 jours, la courbe inférieure se rapporte à l'absorption du nitrate, elle montre, ce qui est bien connu, que l'efficacité d'absorption de l'azote nitrique est inférieure à celle de l'ammonium (HELAL et al., 1975 ; TANG VAN HAI et al., 1983) ; mais aussi, que cette efficacité diminue beaucoup plus rapidement que celle de l'ammonium en approche zéro lorsque la concentration en Na^+ est proche de 40.

C) L'absorption de l'ammonium par le riz dans le sol

L'expérience décrite par la fig. 1 a été répétée en présence du système racinaire de plants de riz à raison de deux plants par colonne de sol repiqués à l'âge de 40 jours en alimentant les colonnes avec les mêmes solutions nutritives où la concentration totale en Na variait de 0 à 10, 30 et 50 mM de NaCl.

Tout comme pour les expériences de lessivage de l'ammonium introduit sous forme d'échelon et dont l'analyse est reproduite à la fig. 1, nous avons continué l'alimentation des colonnes jusqu'à ce que les concentrations à l'entrée et à la sortie des colonnes soient devenues identiques.

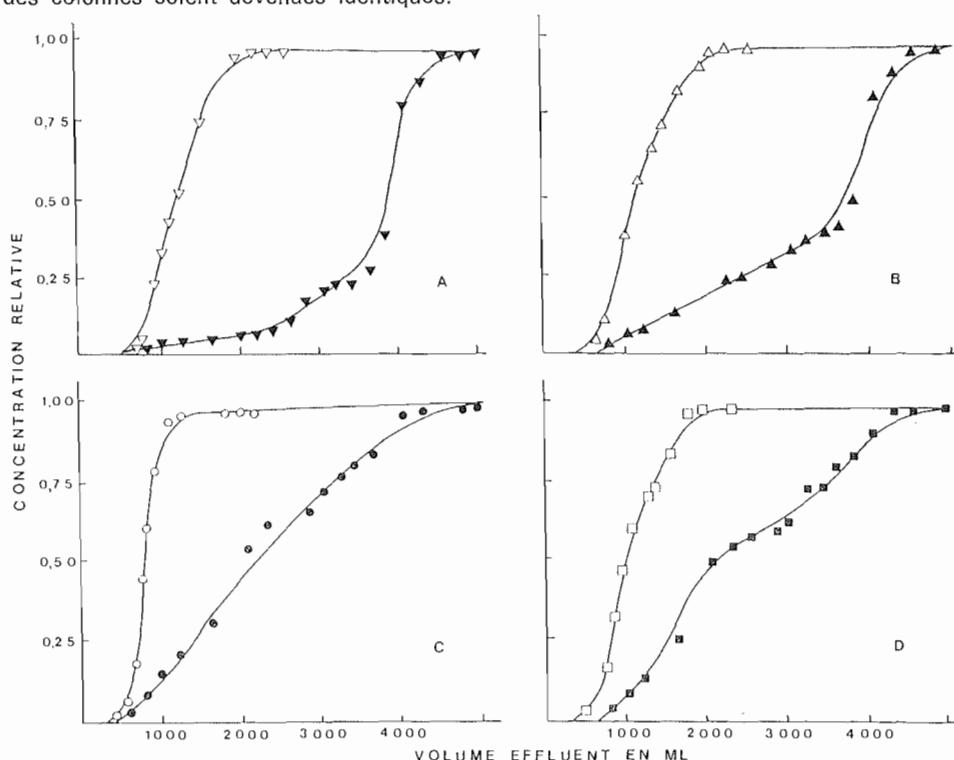


Figure 6 : Mouvement de l'ammonium dans l'échantillon de sol de Relizane avec et sans absorption par les plants de riz. Les points expérimentaux des courbes de gauche ont été utilisés pour l'ajustement des paramètres relatifs à la dispersion hydrodynamique et au facteur de rétention (voir fig. 1). Les courbes de droite représentent la concentration en ammonium de l'effluent lorsque des plants de riz sont présents dans le sol.

Movement of ammonium uptake in the soil of Relizane with and without absorption by the rice plants. The experimental points in the left curves have been used for the adjustment of the parameters related to the hydrodynamic dispersion and the factor of retention (see fig. 1). The right curves represent the ammonium concentration in the effluent when rice plants are present in the soil.

L'absorption de l'ammonium par la plante va modifier considérablement la courbe d'élu­tion de l'ammonium. La différence entre les deux courbes permet d'estimer objectivement l'effet de la présence du système racinaire sur le facteur de rétention de l'ammonium.

La modification que subissent les courbes d'élu­tion est illustrée à la fig. 6 A à D où nous avons repris les données expérimentales de la fig. 1.

A la figure 6, les points expérimentaux n'ont pas été ajustés à une solution analytique de l'équation de diffusion avec convection. Les courbes continues qui y figurent ont été lissées manuellement. Une autre différence entre les courbes de la fig. 1 et de la fig. 6 est que seules les ordonnées sont exprimées de façon adimensionnelle, c'est-à-dire en concentration relative : rapport de la concentration en ammonium de l'effluent à la concentration à l'admission.

Les abscisses portent les volumes de solution qui ont traversé le récipient de culture contenant soit, l'échantillon de sol, soit, l'échantillon de sol plus le système racinaire des deux plants de riz.

Nous avons utilisé deux abscisses différentes à la fig. 1 et à la fig. 6, il s'agit de résultats « bruts » non susceptibles d'ajustement à une courbe théorique comme ceux de la fig. 1, faute d'une formulation analytique du terme « puits » dans l'équation de diffusion avec convection.

Il est clair que la quantité d'ammonium absorbé par le système racinaire du riz est proportionnelle à la surface comprise entre les deux courbes d'élu­tion, lesquelles se confondent finalement avec l'horizontale : $C/C_0 = 1$.

Par conséquent, une intégration graphique de cette surface sera une mesure de la quantité d'ammonium absorbé par le riz. Le résultat de cette intégration pourra aisément être converti en quantité d'ammonium absorbé par plante compte tenu du volume écoulé et de la concentration connue expérimentalement à l'admission dans le récipient de culture.

Tableau II : Influence de concentration croissante en Na^+ sur l'efficacité de l'absorption de l'ammonium à partir d'une solution traversant le sol à débit constant.

Efficiency of ammonium uptake by the constant flow rate through a soil column at different sodium concentrations.

Concentration en Na (mM)	Ammonium absorbé	
	en % du témoin	en mg/plante
0 (témoin)	100	12,0
10	89	10,5
30	63	7,4
50	59	7,0

Les résultats de ce calcul sont reportés au tableau II en valeur absolue et en valeur relative au témoin ne contenant pas de chlorure de sodium et les quantités d'ammonium sont effectivement absorbées par les plantes pour un volume total de 5000 ml de solution nutritive. Nous avons utilisé l'expression « efficacité d'absorption » pour le résultat de l'intégration graphique de la surface entre les deux courbes d'élu­tion.

Les résultats de ce calcul montrent, ce qui était déjà apparent sur la figure 6, que lorsque la concentration en NaCl augmente, une proportion de plus en plus importante de l'ammonium traverse la colonne de sol sans être utilisé.

On pourrait calculer la fraction de l'azote non utilisé en divisant par la quantité d'ammonium fournie soit VC_0 où V est le volume qui a traversé la colonne et

C_0 , la concentration à l'admission, la quantité d'ammonium consommée qui serait donnée par

$$C_c(V - \int_0^V (C/C_0)' dV) - C_0 (\int_0^V (V - \int_0^V (C/C_0)'' dV))$$

où les accents ' et '' se rapportent respectivement aux courbes d'éluion, c'est-à-dire à la consommation initiale en ammonium en absence de plantes et à la concentration en ammonium de l'effluent en présence de plantes dans l'échantillon de sol. La surface comprise entre les deux courbes d'éluion est donc bien une mesure de l'efficacité d'absorption.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Le but essentiel de la série de déterminations dont les résultats viennent d'être présentés ci-dessus était de trouver une relation entre les divers facteurs qui affectent le mouvement de l'ammonium dans l'échantillon de sol et vers la plante lorsque la solution devient de plus en plus saline.

La détermination des paramètres relatifs au mouvement de l'ammonium dans l'échantillon de sol est relativement aisée puisqu'il s'agit d'ajuster, à partir des points expérimentaux sur la concentration de l'effluent, une solution de l'équation aux dérivées partielles satisfaisant à des conditions initiales et aux frontières dont le réalisme est dû à un préconditionnement de la colonne au point de vue de son milieu ionique.

On met ainsi en évidence l'influence de la concentration en sel. La dispersion du soluté augmente d'abord avec la concentration en NaCl, puis, diminue, ce qui se marque par la variation de la distance de dispersion.

L'autre paramètre, relatif au mouvement de l'ammonium dans un échantillon de sol, est le facteur de rétention que l'ajustement des solutions analytiques aux points expérimentaux permet d'obtenir sans difficulté et à partir duquel le coefficient de partage de l'ammonium entre la solution et les surfaces solides du sol peut facilement être calculé. Ce facteur de rétention et le coefficient de partage qui en est déduit recouvrent un ensemble de processus dans lesquels l'ammonium est impliqué : échange ionique et fixation irréversible plus ou moins prononcée suivant la nature des colloïdes minéraux du sol.

Il serait difficile d'expliquer l'augmentation régulière du coefficient de partage de l'ammonium entre la solution et les surfaces du sol (tableau I) au fur et à mesure que la concentration en NaCl augmente. Pourquoi une augmentation du sodium échangeable consécutive à l'accroissement de sa concentration dans la solution nutritive favorise-t-elle l'absorption du NH_4^+ par rapport aux ions Ca^{++} et Mg^{++} qui se trouvaient à la surface des colloïdes : soit en raison du préconditionnement des colonnes au $CaCl_2$ 0,01 M, soit, en raison de l'absorption par échange des cations de la solution nutritive ? On ne pourrait répondre à cette question que si l'on possédait plus d'information concernant l'échange ternaire ($Ca^{++} + Mg^{++}$), NH_4^+ , Na^+ où Ca^{++} et Mg^{++} sont supposés avoir un même comportement d'échange ionique.

Des expériences « statiques » d'absorption de l'ammonium par une suspension de sol constamment agitée donnent des résultats pour le coefficient de distribution de l'ammonium qui traduisent une plus grande adsorption que les expériences « dynamiques ». Un tel résultat était aisément prévisible, il est toutefois intéressant de noter que les deux estimations diffèrent par un facteur de 3 seulement. Etant donné l'utilité du paramètre R, des expériences simples permettraient d'y accéder assez aisément.

La mesure de l'absorption de l'ammonium par perfusion continue du système racinaire de plants de riz intacts avec une solution nutritive contenant des concentrations croissantes en NaCl a essentiellement démontré que l'utilisation du nitrate par les plantes (dont on sait depuis longtemps qu'elle est inférieure à celle de l'ammonium) est nettement plus déprimée par le NaCl que celle de l'ammonium.

En fait, elle est pratiquement nulle lorsque la concentration en NaCl est 40 mM. Une telle concentration n'est pas exceptionnelle dans beaucoup de sols salés. Il s'imposait évidemment d'étudier la mesure dans laquelle le processus d'oxydation biologique de l'ammonium était influencé par la concentration en NaCl.

Il restait évidemment à considérer l'effet du sol sur l'absorption de l'ammonium lorsqu'une solution nutritive est perfusée à travers un sol contenant le système racinaire de plants de riz. Il n'y a pas de différence essentielle entre la réduction de l'absorption de l'ammonium, soit, en solution où elle est réduite de 50 pour cent en présence de 40 mM de NaCl, soit, en présence de sol où elle est réduite de quelque 40 pour cent.

Dans quelle mesure la technique de préparation des sols qui nous a été indispensable pour permettre l'expérimentation (échantillon de sol enrichi de sable) modifie-t-elle les conclusions pratiques éventuelles de ces essais qui ne reflètent pas les conditions naturelles aux champs ?

Des recherches en ce sens pourraient être entreprises ultérieurement, portant notamment sur l'incidence des microsites anaérobies, sur le bilan de l'azote, sur la morphologie de l'espace poral et le rôle de l'architecture du développement racinaire sur le transfert des solutés.

Enfin, l'optimisation du coefficient d'utilisation de l'engrais azoté ainsi que la réduction de la pollution des nappes phréatiques devraient se réaliser dans des conditions qui minimisent la vitesse d'oxydation biologique de l'azote ammoniacal tant pour les sols salés de l'Algérie que pour les sols de limon de la Belgique.

Reçu pour publication : Février 1988
 Accepté pour publication : Juillet 1988

REMERCIEMENTS : A. DELLAL et F. ETRIBY remercient le Service de Coopération au Développement de cette Université pour l'octroi d'une bourse de doctorat.

La réalisation matérielle de ce travail a été considérablement aidée par un contrat de la Communauté Européenne (Réf. n° TSD-A-193-B(S)).

Nous remercions sincèrement Monsieur le Professeur LAUDELOUT pour ses conseils pendant l'exécution de ce travail. Il a également effectué les calculs d'ajustement des concentrations des effluents aux courbes théoriques, ce dont nous lui sommes reconnaissants.

ABSORPTION AND MOVEMENT OF AMMONIUM IN SALINE SOIL. DYNAMIC OF AMMONIUM IN SALINE SOIL.

This paper presents data on the convective dispersive movement of ammonium in soil, on the perfusion of the root system of intact rice plants by a nutrient solution and on the perfusion of a saline soil from the vicinity of Relizane (Algeria) containing the root system of intact rice plants. All experiments were repeated at NaCl concentrations varying from 0 to 50 mM. (Fig. 1 and Table I).

Non linear adjustment of the experimental elution curves through the soil allowed the calculations of two important parameters determining the movement of ammonium through the soil : the dispersion length characteristic of the pore system as modified by the salinity of the percolating solution. (Fig. 2 and Fig. 3).

A comparison of the absorption efficiency of ammonium by intact 40 to 60 days old rice plants, the roots of which were either in a solution of in a soil-sand mixture has not shown any noticeable with respect to the effect of the root environment (Fig. 4 and Table II).

We have observed that nitrate uptake efficiency decreased to negligible values as soon as NaCl concentration reached 40 mM. (Fig. 5).

It seems therefore that for soils of North Africa, where problems of salinity appear as for the loamy soils of N.W. Europe, the optimization of utilization coefficient of nitrogen fertilizer and the reduction of pollution of ground-water can only be achieved under conditions that minimize the rate of the ammoniacal nitrogen biological oxydation.

BIBLIOGRAPHIE

- BERNSTEIN L., 1970. — Salt tolerance of plants. Agric. Inform. Bull., 283.
- BOULAINE J., 1957. — Les sols des plaines du Chélif. Thèse de doctorat d'état, 582 p., Alger.
- HELAL M., KOCH K., MENGEL K., 1975. — Effects of salinity and potassium on the uptake of nitrogen and on nitrogen metabolism in young barley plants. *Physiol. Plant.*, 35, 310-313.
- KADDAH M.T., LEHMAN W.F., ROBINSON F.E., 1983. — Tolerance of rice (*Oryza sativa* L.) to salt during boot, flowering and grain filling stages. *Agr. Journal*, 65, 845-847.
- MAAS E.V., NIEMAN R.H., 1978. — Physiology of plant tolerance to salinity. *Am. Soc. Agron. Spec. Publ.*, 227-299.
- PECROT A., REMY J., TAVERNIER R., 1956. — Carte des sols de Belgique, éditée par le Comité pour l'établissement de la carte des sols et de la végétation de la Belgique.
- TANG VAN HAI, LAUDELOUT H., 1966. — Phosphate uptake by intact rice plants by the continuous flow method at low phosphate concentrations. *Soil Sci.*, 101 : 408-417.
- TANG VAN HAI, DE CUYPER X. LAUDELOUT H., 1983. — Influence de l'aluminium sur l'absorption du phosphore par le riz (*Oryza sativa* L.) et sur celle de l'azote en présence de différentes concentrations en potassium. *Agronomie*, 3(5), 417-421.
- VAN GENUCHTEN M. Th., WIERENGA P.J., 1976. — Mass transfer studies in sorbing porous media : I. Analytical solutions. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 40 : 473-480.
- VAN GENUCHTEN M. Th., WIERENGA P.J., 1977. — Mass transfer studies in sorbing porous media : II. Experimental evaluation with tritium ($^3\text{H}_2\text{O}$). *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 41 : 272-278.
- VAN GENUCHTEN M. Th., 1981. — Non equilibrium transport parameters miscible displacement experiments. Research report n° 119, U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California, 88 p.

