Evaluation de l'azote nitrique lixiviable: Expérimentation lysimètrique, et simulation mathématique

H.DAKAK [(1)] - A. BENMOHAMMADI[(2)] - B. SOUDI [(3)] - M. BENZAKOUR [(4)] - C.N. CHIANG[(5)] - M. BADRAOUI[(3)]

(1) Unité de Recherche sur l'Environnement et la Conservation des Ressources Naturelles, INRA, Rabat. Dakak_h@yahoo.fr

(2) Département des Sciences de la Terre. Faculté des Sciences IbnoToufail de Kenitra

(3) Département des Sciences du sol, I.A.V. Hassan II, Rabat.

(4) Département des Sciences de la Terre. Faculté des Sciences de Rabat

(5) Unité MBLA, Faculté des Sciences Agronomiques de Louvain, Belgique

1. Résumé

Une expérimentation lysimètrique, menée avec deux types de cultures blé tendre et betterave sucrière, a été conduite dans le Tadla dans la station expérimentale d'Ouled Gnow située au périmètre des Béni Moussa Est. Cette expérimentation vise de quantifier l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux et particulièrement sur la lixiviation des nitrates. Ce dispositif expérimental a permis de déterminer les quantités d'azote nitrique réellement lixiviées qui sont 51.2kgN/ha et 34.6kgN/ha respectivement pour la betterave sucrière et le blé tendre. Parallèlement, un modèle de simulation mathématique de lixiviation des nitrates utilisant les données lysimètrique ainsi que les caractéristiques hydrodynamiques du sol a montré qu'une hauteur d'eau de 1 m appliquée engendre un déplacement de l'ordre nitrique de 7.1mm et de 8 mm dans les profils du sol respectivement exprimés pour le blé et la betterave à sucre. Ainsi les quantités d'azote nitrique lixiviées calculées par ce modèle de simulation sont de l'ordre de 9.8kgN/ha pour le blé et 86.2kgN/ha pour la betterave sucrière. Une comparaison des quantités d'azote lixiviées calculées par les deux approches a été effectuée et les avantages et inconvénients de chacune des deux approches ont été discutés.

2. Introduction

L'azote nitrique est l'élément qui pose le plus de problèmes en agriculture. Les nitrates très solubles et mobiles dans la solution du sol sont facilement lixiviés vers les eaux souterraines et constituent ainsi une source potentielle de pollution de la nappe phréatique par les nitrates (Zoller, 1994, Soudi, 1995). Les cases lysimétriques constituent un outil idéal pour quantifier l'impact des pratiques agricoles sur la qualité des eaux (Suzuki et al, 1992 ; Denys el al, 1990 ; Guiot, 1975) et tout particulièrement sur la lixiviation des nitrates. En effet, les dispositifs lysimétriques permettent la maîtrise des entrées et des sorties dans le système sol-plante-effluent et par conséquent l'établissement du bilan de masse d'azote. En outre, ils présentent l'avantage de relier les flux à certains types de pratiques et d'occupation des sols (Simon et al., 1989 et Haghiri et al., 1978).Dans la présente étude, un dispositif expérimental constitué de deux cases lysimétriques, installé au niveau de la station expérimentale d'Ouled Gnaow, a contribué à l'étude de la migration des nitrates dans le sol. Ceci a permis : (i) d'évaluer les quantités de nitrates lixiviées au delà de la zone racinaire et (ii) d'estimer les quantités d'azote nitrique dans les eaux infiltrées qui sont susceptibles d'atteindre les eaux souterraines.

En outre, il a été jugé utile de tester un modèle de simulation mathématique du transfert des nitrates à travers le profil du sol. Il s'agit d'un modèle simplifié de Laudelout et al, (1991) qui a consisté à simuler la percolation des nitrates après application d'une lame d'eau d'irrigation. Ce modèle exclut le prélèvement par la plante et minimise les transferts d'azote entre ses différents pools. Seul l'azote nitrique présent dans le profil du sol est pris en considération. Ainsi, le modèle se résume en un transfert non réactionnel dans une colonne du sol.

3. Matériel et méthodes

3.1. Lysimétrie

3.1.1. Dispositif expérimental :

***le site d'expérimentation et dispositif lysimètrique :**

L'expérimentation a été conduite dans la station d'Ouled Gnow localisée dans le périmètre des Béni Moussa Est. La parcelle comporte deux lysimètres constitués de bacs en polyester, présentant une surface de 4 m^2 et une profondeur de 1,5m. Au fond de chaque case, un drain a été installé dans une couche d'environ 60 cm. A la base du profil du sol, une couche filtrante de sable a été placée de telle manière qu'elle permette un drainage optimum. La base est plane avec une faible pente qui converge pour faciliter l'écoulement de l'eau et du drainage vers la fosse de récupération éloignée de 6 m de la cuve. Le système de drainage est constitué par un tuyau galvanisé qui relie la cuve à la fosse de visite.

*** Le sol étudié :** Le sol du lysimètre est de type isohumique appartenant au groupe brun subtropical et au sous groupe des sols bruns modaux. Ce sol est développé sur une roche mère argileuse. Il s'agit d'un sol profond à tâches calcaires. ***L'eau :** Les eaux utilisées pour l'irrigation de la zone de garde, comprennent deux types d'eau : - les eaux pompées directement du puits localisé dans la station

expérimentale d'Ouled Gnow ; - et les eaux percolées sous lysimètre qui ont à leur retour subi un recyclage tout le long de l'expérimentation. ***Le matériel végétal :** L'essai est pratiqué sur deux cultures ; le blé tendre et la betterave sucrière. Ces cultures représentent une proportion importante de l'occupation du sol du périmètre.

3.1.2. Conduite de l'essai

***Paramètres de suivi:** Un certain nombre de paramètres physico-chimiques concernant le sol, l'eau de percolation et l'eau d'irrigation (eau de puits) ont été régulièrement analysées :

Eaux d'irrigation et de percolation **:** Les échantillons des eaux percolées sont recueillis et analysés à chaque irrigation avant le recyclage pour les deux cultures de blé et de betterave à sucre.Les paramètres analysés sont: nitrate; T°C, pH, conductivité électrique. Les mêmes analyses sont réalisées pour l'eau d'irrigation (eau de puits).

Caractérisation physico-chimique du sol **:** La caractérisation du sol a été réalisée au semis et à la récolte, dans le but de connaître l'état actuel du sol lysimètrique. Une attention particulière a été consacrée à l'azote minéral du sol et à sa capacité minéralisatrice. Les paramètres analysés sont : pH, conductivité électrique; les composés azotés(NH_4^+, NO_2^- etNO_3^-); bilan ionique (Cl^-, SO^{2-}_4, HCO_3^-, CO_3^{2-} ,K^+, Ca^{2+}, Na^+, et Mg^{2+}) et les orthophosphates (PO^{3-}_4). Ces essais ont permis particulièrement d'évaluer le flux de l'azote et de calculer les quantités lessivées (au-delà d'une profondeur de 1,5 m) qui atteindront potentiellement la nappe.

***Irrigation :** 20 arrosages ont été réalisés au cours d'une durée de cycle cultural d'environ 5 mois s'étalant de Mars à Juillet, avec l'application de deux types d'eau : l'eau de puits et l'eau percolée recyclée. Une dose de 25 l/j, soit 175 l/semaine a été appliquée pour la culture du blé et une dose de 30 l/j, soit 210 l/semaine pour la betterave sucrière. Cet essai a duré 20 semaines avec une fréquence d'irrigation de l'ordre d'une fois par semaine. Le choix des doses d'irrigation a été imposé par les conditions expérimentales relatives aux essais conduits sur les besoins en eau des cultures. Rappelons, que notre expérimentation s'est greffée sur ces essais.

***Fumure azotée :** Rappelons que deux cultures ont été expérimentées en cases lysimétriques. Il s'agit de la betterave sucrière et du blé tendre. La fumure appliquée au sol pour le cas de la betterave sucrière est l'engrais de fond sous forme de sulfate d'ammonium (21 %), et l'engrais de couverture sous forme d'ammonitrate (33 %). Pour le cas du blé tendre, la nature d'engrais appliquée est l'engrais de fond sous forme de sulfate d'ammonium (21%), et l'engrais de couverture sous forme d'urée (46 %).Les quantités totales d'unités d'azote appliquées sont de 196 Kg/ha et 117 Kg/ha respectivement pour la betterave sucrière et le blé tendre.

3.2. Simulation mathématique

Le modèle de simulation adopté consiste à une dispersion quantitative du mouvement d'un soluté à travers le sol par diffusion ou par transport convectif par l'eau qui percole à travers le sol. Les solutés se trouvant dans le fluide déplaçant sont transférés à travers le sol par convection (transfert de masse) et par diffusion. Cependant, le flux dans une colonne de sol est erratique c'est à dire qu'il varie essentiellement en grandeur et en direction de chaque point du système suite à une géométrie complexe (tortuosité) du milieu poreux. L'établissement du modèle est basé sur l'équation générale de transport de soluté (convection + dispersion) :$\delta c/\delta t = Dap\ \delta^2 c/\delta x^2 - q\ \delta^2 c/\delta x^2$

Les deux paramètres importants sont la vitesse de Darcy q et le coefficient de dispersion Dap (dispersion mécanique et diffusion moléculaire). Ce dernier caractérise l'extension de la zone de transition du polluant (De-Marsily, 1981).

Application du programme de calcul

Calage du modèle : Il consiste à rechercher une solution qui soit cohérente avec les données introduites. Le modèle est calé en fixant la vitesse moyenne de l'eau dans les pores et le volume poral dont les valeurs sont calculées à partir de l'équation suivante :

* La vitesse moyenne d'écoulement du fluide est calculée par la relation : $V = V_{do}/\theta$

Ou θ = Porosité (cm^3/cm^3) V_{do} = vitesse du fluide à l'entrée de la colonne

* Le volume poral est donné par la relation suivante :$Vo = \theta V_{tot} = Q.A.L$

Ou : θ = porosité A = section L = longueur

*La valeur du coefficient de dispersion est déterminée à l'aide d'une opération de tâtonnement qui fait partie de la

démarche du calage. Toutefois, nous nous sommes limités à la fourchette des valeurs fournies par la littérature ($1,97\ cm^2/j < Dap < 45,6\ cm^2/j$) avec 1,7 cm^2/h présentant ainsi la valeur utilisée dans nos calcul.

* Le nombre de peclet est : P = Vo.L/D

Avec Vo = Vitesse moyenne (cm/h). L = Longueur du profil. D= Dispersion en (cm^2/J).

*Pour le lysimètre sous blé, le nombre de peclet est égal à 24, soit 12 couches théoriques qui vont constituer le profil alors que celui sous betterave, le nombre de peclet est égal à 18, soit 9 couches théoriques qui vont constituer le profil.
*Pour le calcul des quantités d'azote nitrique lixiviées, deux modalités ont été adoptées. La première consiste à simuler chaque irrigation sans prendre en considération l'enrichissement du profil avec l'azote provenant des eaux et ou de la minéralisation. La seconde consiste à simuler chaque irrigation avec enrichissement du profil du sol avec l'azote nitrique provenant des eaux d'irrigation d'effluent et de l'azote minéralisable.

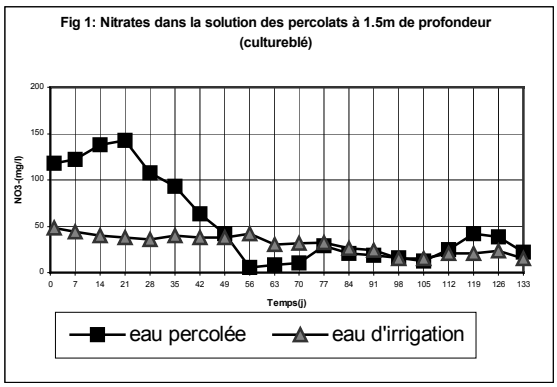
4. Résultats

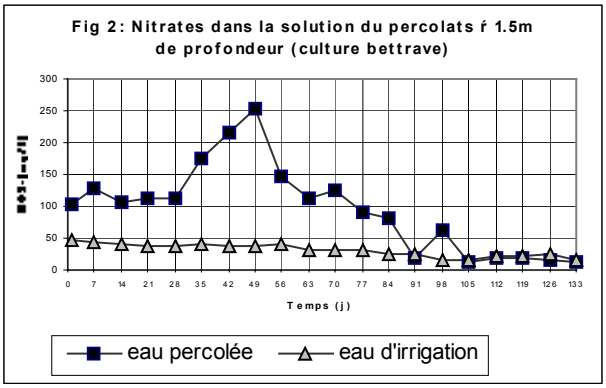
4.1. Lysimétrie : Les figures 1 et 2 montrent que les eaux percolées du lysimètre sont très chargées en nitrates par rapport aux eaux de puits. Le pool d'azote nitrique est alimenté en partie par l'azote nitrique apporté par les eaux d'irrigation, les fertilisants azotés utilisés au cours de l'essai, la minéralisation de l'azote organique dans le sol, la nitrification de l'azote ammoniacal, et le reliquat du sol. Pour comprendre l'évolution de l'azote nitrique, nous allons essayer de rapprocher celle-ci aux variations de ces facteurs

Au début du cycle végétatif de la culture de betterave et du blé, la quantité de nitrate contenue dans l'eau des percolats est supérieure à celle des eaux d'irrigation en enregistrant une augmentation progressive durant les treize et les huit premières semaines (Mars-Avril); elle atteint un maximum de 250 mg/l au 49ième jour (Avril) de 148 mg/l au 21ième jour (Mars) respectivement pour la betterave et le blé. Cette lixiviation excédentaire est attribuée à la faible absorption d'azote par la plante, à l'incidence des précipitations (25 à 30mm), à la basse température (5° à10°c), limitant ainsi l'activité microbienne, et aux irrigations excessives qui jouent le rôle de piston en déplaçant vers le bas la solution du sol. On peut également ajouter, l'effet des reliquats non consommés des cultures pratiquées précédemment et les fertilisants utilisés aux mois de Décembre- Février qui ne se sont manifestés que durant la période Mars-Avril ;

Ensuite, on assiste à une régression rapide de NO_3^- pour atteindre une teneur de 12 mg/l au 105ième jour (juin) et 5 mg/l au 56ième jour (fin Avril début Mai) respectivement pour la betterave et le blé. Cette baisse des teneurs d'azote nitrique en fonction du temps, peut être classiquement interprétée comme étant due aux conditions d'anaérobiose partielle causées momentanément par des humidités dépassant la capacité de rétention en raison des volumes d'irrigation apportés. Ces conditions réduisent le flux d'oxygène et favorisent une éventuelle dénitrification. (Billaut 1989). Ainsi, cette diminution peut être aussi attribuée au développement du système racinaire. Celui-ci va jouer le rôle d'inhibiteur du lessivage de cet élément vers la nappe, par le phénomène d'absorption.

D'après les déterminations et les mesures effectuées durant les cycles végétatifs de la betterave et du blé, concernant le volume d'eau percolée et sa concentration nitrique, on peut déduire que la quantité des nitrates lixiviées sous betterave est de l'ordre 90,6 g du NO_3^- soit 51,2 kg N/ha, alors que celle lixiviées sous blé est de l'ordre 61,3 g du NO_3^- soit 34,6 kg N/ha



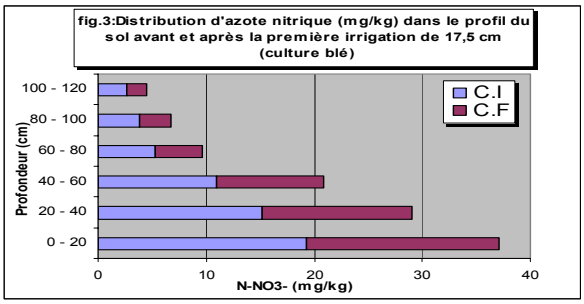


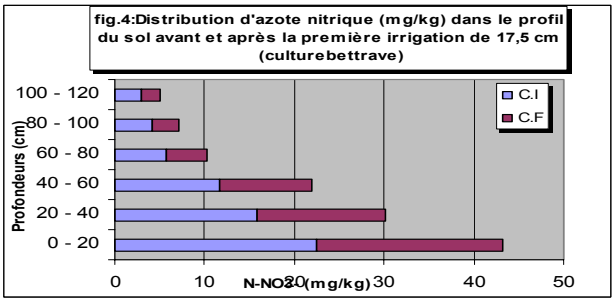
4.2. Simulation mathématique

4.2.1. Evaluation de l'azote nitrique lixiviées par la méthode du profil nitrique : Le calage du modèle de simulation s'est basé que les données relatives aux profils d'azote nitrique avant et après irrigation.

La distribution initiale de N - NO^-_3 sous blé avant et après la première irrigation pour une dose de 17,5 cm d'eau de puits, est rapportée dans la fig.3.Les différences entre l'état initial et l'état final permettent de calculer une quantité d'azote nitrique réellement lixiviée de 6,6mg/kg du N-NO^-_3 pour tout le profil (0-120 cm), soit 117 kg/ha du N-NO^-_3. Concernant la betterave, la fig.4 montre la distribution d'azote nitrique avant et après l'irrigation hebdomadaire apportant une lame d'eau de 21 cm d'eau de puits. Les différences entre l'état initial et l'état final permettent de calculer une quantité d'azote nitrique réellement lixiviée de 7,7 mg/kg du N-NO^-_3

pour 0-120 cm, soit 138,6 kg/ha du $N\text{-}NO^-_3$. Comme on peut le constater, ces données ont permis en plus du calage du modèle, d'évaluer des quantités de nitrates lixiviées après une première irrigation.





4.2.1. Evaluation de l'azote nitrique par simulation mathématique :.

***1ère modalité : simulation pour chaque irrigation sans prendre en considération l'enrichissement du profil avec l'azote nitrique :** Dans cette première modalité, on suppose qu'il n'y a aucune source d'azote minéral du profil en azote et on simule de manière successive la lixiviation des nitrates pour les 20 irrigations. L'approche du modèle permet de visualiser la distribution de l'azote nitrique après chaque irrigation Les différences obtenues entre l'état initial et l'état final pour chaque irrigation avec une dose d'arrosage de 17,5 cm et de 21 cm respectivement pour le blé et la betterave montrent des valeurs d'azote nitrique lixiviées qui varient de 0,9 à 9,5 mg/kg pour le blé et de 0,2 à 12,3 mg/kg pour la betterave. Notons que les fréquences d'irrigation utilisées ont conduit à une vidange du profil qui peut aller jusqu'à 0,9 et 0,2 mg/kg pour le blé et la betterave.

En supposant que les entrées et les sorties de l'azote nitrique sont nulles dans le système sol-plante, cette modalité consistera en l'examen de la cinétique de vidange ou d'épuisement du stock initial en azote dans le profil, suite aux 20 irrigations successives. L'examen de cette cinétique montre qu'à partir de la 9ième et de la 7ième irrigation, l'épuisement d'azote nitrique est atteint respectivement pour le blé et la betterave.

Le calcul du déplacement de l'onde nitrique pour les 20 irrigations avec une lame d'eau de 17,5 cm chacune, nous donne une moyenne de 12,5 cm de profondeur pour 350 cm pour la culture du blé. Ainsi 1 cm d'eau appliquée engendre un déplacement de l'onde nitrique de 0,71 cm, soit 71 mm. Alors pour la betterave, la dose d'irrigation de l'onde de 21 cm d'eau engendre un déplacement de l'onde nitrique de
16,7 cm. Ainsi 1 cm d'eau correspond à 79 mm de flux dans le sol.

***2ème modalité : simulation pour chaque irrigation avec enrichissement du profil avec l'azote nitrique de l'eau recyclée dans l'eau d'irrigation (Eau de puits) et d'azote minéralisable :** Cette démarche, consiste à enrichir la première couche théorique imposée par le modèle avec des doses d'azote nitrique calculées à partir des concentrations des percolats et de l'eau de puits pour chaque irrigation durant tout le cycle végétatif du blé tendre et de la betterave . Aussi, elle tient compte, en plus de l'azote apporté par les eaux d'irrigation, de l'azote nitrique provenant de la minéralisation de l'azote organique et de la nitrification de l'azote ammoniacal. Cette source supplémentaire correspond au produit KNo, avec K comme constante de vitesse de minéralisation et No représentant l'azote potentiellement minéralisable du sol. Ces deux paramètres ont été calculés en appliquant aux courbes cumulées de minéralisation une cinétique de premier ordre. (Dakak, 1996).

Le produit KNo obtenu correspond à la quantité d'azote minéralisée par semaine. Les valeurs de No et K, calculées pour le cas du sol expérimenté sont respectivement de 172 mg/kg et 0,052 sem^{-1}.Ainsi, le produit KNo correspond à une quantité minéralisée et nitrifiée par semaine de 8,9 mg/kg. Cette valeur est déterminée sur la base de valeurs de K et de No obtenues en conditions optimales. Ainsi la valeur de 8,9 est potentielle ; pour cela il convient de la corriger en se basant sur le facteur température.

A ce sujet, Stanford *et al* (1973) ont trouvé dans la gamme habituelle de température 5-35° C que la minéralisation croît avec un incrément thermique Q_{10} égal à 2 (l'azote minéralisé double après une augmentation de la température de 10°C). Les valeurs de la constante de vitesse K ont été corrigées. Ainsi, le cycle végétatif a été subdivisé en deux périodes correspondant aux températures de 15 °C et de 25 °C. Ensuite, cette quantité corrigée est ajoutée comme un intrant dans les couches fictives 0-6 et 6-19 cm pour le blé et de 0-8 et 8-25 cm pour la betterave. Les doses sont introduites pour chaque irrigation tout en additionnant les quantités d'azote

nitrique véhiculées par les eaux d'irrigations. Le choix de la couche superficielle 0-20 ou 0-25 cm se justifie par le fait que les quantités d'azote minéralisées sont intenses et prédominantes dans ces couches. (Hadas *et al*, 1986).

Pour le cas du blé, les résultats montrent des valeurs variant de 3,8 à 9,9 mg/kg , avec une concentration d'azote nitrique lixiviée de 117,6 mg/kg, soit 26,5 mg N/kg, donnant ainsi une quantité de 477 kg/ha d'azote. Alors pour la betterave, les résultats montrent des valeurs variant de 4,1 à 13,5 mg/kg, avec une somme de 174,3 mg/kg du $N\text{-}NO_3^-$, soit 26,5 mg N/ha. Ce qui donne une quantité de 709,2 kg/ha d'azote

Ainsi l'étude de la cinétique de déplacement de l'onde nitrique dans le profil du sol permet de conclure qu'au niveau de la culture du blé, les doses de 17,5 cm et de 21 cm engendrent des déplacements de 71mm pour le blé et 80 mm pour la betterave ; et ce n'est qu'à partir de la 10ième et de la 5ième semaine qu'on observe la vidange totale du profil respectivement pour le blé et la betterave.

On note qu'au niveau de la réalisation de ce modèle, les qualités d'azote exportées, volatisées Nvol) et résiduelles dans le sol, (Nr) sont exclues, ce qui a donné lieu à des valeurs d'azote lixiviées élevées (2ième modalité). Si on tient compte de ces facteurs, les quantités d'azote lixiviées deviennent 59,8 Kg N/ha et 84,2 Kg N/ha respectivement pour le blé et la betterave sucrière. La différence nous donne : 709,2 - (233+61,3+42,5+288)= 84,2kg/ha.

CONCLUSION

Les résultats ont montré qu'au-delà d'une profondeur de 1,5 m pour une dose de 30 l et 25 l/jour Correspondent respectivement à 51,2 Kg/ha et 34,6 Kg/ha durant le cycle des cultures de la betterave et du blé. L'évolution des nitrates dans les effluents lysimétriques montre que la période de lessivage élevée se situe au printemps. Cette période coïncide avec une phase de minéralisation intense

L'essai de simulation du transport des nitrates dans le sol appréhendé par l'utilisation du modèle de Laudelaut *et al*, (1991) montre qu'il y a une augmentation d'azote nitrique lixiviés au delà du sol vers les zones de profondeur avec des valeurs du lixiviat importante de 477 kg N/ha pour le blé et de 792 kg N/ha pour la betterave ; ceci montre que la culture de betterave présente un danger non négligeable pour l'eau de la nappe et pour l'environnement. Ce modèle, exclut l'azote exporté, volatisé, et résiduel dans le sol, ce qui a donné lieu à des valeurs élevées. Ainsi la soustraction de ces sorties a donné des valeurs de lixiviation de 59,8 kg N/ha et de 84,2 kg N/ha respectivement pour le blé et la betterave. Aussi, les distributions verticales de nitrate obtenues par simulation et pour chaque irrigation ont permis de calculer un déplacement moyen de l'onde nitrique de 71 mm et de 80 mm après application d'une hauteur d'eau de 1 cm

Lorsqu'on comptabilise les avantages de celle-ci, tout en comparant les deux méthodes, on peut dire que:

La méthode lysimétrique a permis de quantifier les quantités d'azote nitrique réellement lixiviées au delà de la zone racinaire. Mais elles ne permettent que des déterminations ponctuelles dans l'espace dont l'installation demeure les dispositifs fastidieuse et coûteuse. Alors que l'approche de modélisation peut être considérée comme une meilleure alternative moyennant une amélioration du modèle et la disponibilité de certaines quantifications de transformations et de transfert de l'azote dans le contexte pédoclimatique étudié

REFERENCES

Dakak, H. 1996.Etude de la pollution nitrique du périmètre du Tadla : Vulnérabilité et Impact des activités agricoles. Thèse de 3ème cycle, Fac. Sci. Rabat.

De Marsily, G ; 1981 . Hydrogéologie quantitative. Editions Masson

Hadas, A.S. Freigenbaum, A.Feigin, et Portony, R. ; 1986 : Nitrogen minéralization in profiles of différent by, managed soil types. Soil. Sci. Soc. Am. J.

Laudelaut, H., et al. ;1991 . Simulation des processus pédologiques dans les sols Maghrebins. Actes Editions de l'I.A.V Hassan II

Soudi, B. Et al. ;1995 . Mise en place des réseaux de suivi de la nappe phréatique et de la qualité des sols et des eaux du périmètre de Tadla Rapport M.R.T N° 608-0213-3-20014.

Stanford, G., M.H. Frère, and D.H. Schwaninger.; 1973: Temperature coefficient of soil nitrogen mineralization. Soil Sci. 115, (4), pp: 321-323.

Suzuki,T.,Takao Katsuno et Gentaro Yamaura.;1992. Land application of wastewater using three types of trenches set in lysimètres and is Mass Balance of nitrogen. Wat. Res., 11 (26) pp : 1433-1444

Zoller, I. 1994 :: Non-ionic surfactants in reused water : are actived sludge/soil aquifer treatements sufficient. Wat. Res. 28 (7), pp : 1625-1629.